

Е.Э.Фельдштейн, М.А.Корниевич

РЕЖУЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕЭВЕРЛОВЕНТНЫХ ПРОФИЛЕЙ

*Допущено Министерством образования
Республики Беларусь в качестве учебного
пособия для студентов машиностроительных
специальностей высших учебных заведений*

Минск
Издательство «Дизайн ПРО»
2000

УДК 621.9.02(075.8)
ББК 34.63-56-02я7
Ф39

Рецензенты: Кафедра «Металлорежущие станки и инструменты»
Могилевского государственного технического университета;
доктор техн. наук, профессор Н.Н.Макаров

Фельдштейн Е.О., Корниевич М.А.

**Ф39 Режущие инструменты для обработки незвольентных профилей. -- Мн.: Дизайн ПРО, 2000. -- 112 с., ил.
ISBN 985-452-033-1**

Содержатся сведения об особенностях проектирования фасонных и угловых фрез для обработки винтовых канавок различной формы, червячных фрез, обкаточных резцов, долбяков. Наряду с теоретическими выкладками приводится ряд цифровых примеров.

Для студентов машино- и приборостроительных специальностей ВУЗов, учащихся техникумов, работников промышленных предприятий.

Гос. заказ

УДК 621.9.02(075.8)
ББК 34.63-56-02я7

ISBN 985-452-033-1

© Фельдштейн Е.О.,
Корниевич М.А., 2000
Оформление издательство
«Дизайн ПРО», 2000

ВВЕДЕНИЕ

Развитие машиностроения привело к созданию и широкому использованию деталей сложных пространственных форм, которые отличаются высокими эксплуатационными характеристиками. Недостаточная подготовленность инженеров-конструкторов и технологов к проектированию специальных инструментов для обработки пространственных профилей и невозможность их получения на простейшем технологическом оборудовании универсальными инструментами в конечном итоге приводит к снижению эффективности выпускаемой продукции и делает ее неконкурентоспособной.

Данное учебное пособие является продолжением и развитием опубликованного ранее пособия по дипломному и курсовому проектированию режущих инструментов и позволяет дополнить и улучшить подготовку студентов в вопросах проектирования специальных инструментов. Оно содержит сведения об особенностях проектирования фасонных и угловых фрез для обработки винтовых канавок различной формы, червячных фрез для обработки невольевентных профилей методами копирования и огибания (обкатки), обкаточных резцов различных типов, долбяков для обработки невольевентных профилей. Наряду с теоретическими выкладками приводится ряд цифровых примеров.

В данном пособии гл.1-4 подготовлены Е.Э.Фельдштейном, гл.5 — совместно Е.Э.Фельдштейном и М.А.Корниевичем.

Глава 1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДИСКОВЫХ ФРЕЗ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВИНТОВЫХ КАНАВОК СТЕРЖНЕВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

1.1. ПРОФИЛИРОВАНИЕ ФАСОННЫХ ФРЕЗ

1.1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Обработка деталей с винтовыми поверхностями инструментами, у которых производящая поверхность является поверхностью вращения, занимает значительное место в общем объеме производства. К таким инструментам относятся дисковые и гребенчатые фрезы, шлифовальные круги, резцы-летучки, ролики. Радиусы производящих поверхностей инструментов могут быть любыми, в частности, бесконечно большими, поэтому к группе перечисленных инструментов относятся плоские плашки для накатывания и резцы для строгания винтовых поверхностей. Профилирование указанных инструментов предусматривает решение ряда вопросов, связанных с их проектированием, изготовлением и эксплуатацией:

1) при обработке винтовой поверхности производящая поверхность инструмента, т.е. поверхность резания, описываемая его режущими кромками, должна иметь линейное касание вдоль всех точек всей винтовой поверхности. Такое условие обработки приводит к необходимости рассчитывать профиль инструмента для каждой конкретной винтовой поверхности, отвечающий условию касания;

2) при практически допустимых границах положения оси инструмента относительно детали обработка требуемой винтовой поверхности на всех ее участках не всегда возможна. Несоответствие положения оси инструмента теоретическим требованиям приводит к искажению профиля винтовой поверхности подрезанными участками и различными переходными кривыми. Это обстоятельство приводит к необходимости определения границ и видов указанных искажений;

3) в процессе проектирования инструмента может оказаться, что расчетный профиль по технологическим или другим соображениям не может быть принят в качестве окончательного. Возникает необходимость нахождения предельных отклонений формы профиля винтовой поверхности, вызываемых несоответствием теоретического и окончательного профилей инструмента;

4) многие детали по условиям своей эксплуатации не допускают существенных отклонений профиля винтовой поверхности или отдельного его участка от теоретической формы. В этом случае необходимо определить некоторое оптимальное положение оси инструмента относительно детали, обеспечивающее возможность точной обработки всей винтовой поверхности или ее наиболее важного участка;

5) изготовление инструмента и установка его оси относительно детали осуществляется с некоторыми погрешностями. Это обстоятельство приводит к необходимости анализировать влияние полей допусков исходной инструментальной поверхности на точность обработки винтовой поверхности;

6) в процессе эксплуатации инструмента, в результате его переточек или правок, межосевое расстояние инструмента и детали изменяется. Вследствие этого возникает задача определения отклонений профиля винтовой поверхности при сохранении профиля инструмента или отклонений профиля инструмента, если должен быть сохранен профиль винтовой поверхности.

Многообразие существующих и появление новых винтовых поверхностей в машиностроении требует наличия такого метода профилирования инструментов для их обработки, который позволял бы в производственной обстановке получать с желаемой точностью решение любого из поставленных вопросов для любого конкретного случая обработки винтовой поверхности.

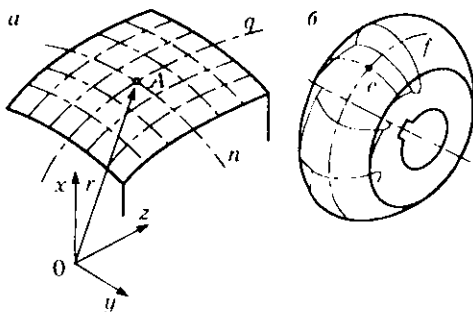


Рис.1.1. Криволинейные координаты на номинальной поверхности детали

Криволинейные координаты на номинальной поверхности могут быть выбраны в широких пределах в зависимости от конкретных условий ее образования.

Фреза в ходе обработки выполняет две задачи — формообразования и срезания припуска, совершая комплекс движений

Номинальная (теоретическая) поверхность детали в общем случае определяется двумя параметрами криволинейными координатами q и n (рис.1.1, а). В системе координат x, y, z , связанной с деталью, уравнение номинальной поверхности в параметрическом виде будет $\mathbf{r} = \mathbf{r}(q, n)$, где $\mathbf{r}$ радиус-вектор, берущий начало в точке O начала координат системы x, y, z . Криволиней-

относительно детали. На фрезе может быть одна или множество режущих кромок, каждая из которых является отрезком линии. Во втором случае считают, что режущие кромки расположены на так называемой производящей поверхности. Эта поверхность определяется двумя криволинейными координатами e и f (рис.1.1, б), а ее уравнение в системе координат инструмента $x_{ин}y_{ин}z_{ин}$ имеет вид $R_{ин} = Q(e, f)$. Системы координат $x_{ин}y_{ин}z_{ин}$ и xyz своим взаимным расположением определяют положение фрезы относительно детали.

В процессе движения инструмента относительно детали производится послойное срезание припуска с номинальной поверхности детали. Инструмент осуществляет это движение при изменении некоторого параметра l от начального $l_{н}$ до конечного $l_{к}$ значений. Тогда в системе координат детали xyz (рис.1.2, а) режущая кромка фрезы сформирует поверхность резания, описываемую уравнением $r = S(k, l)$, где k и l — криволинейные координаты на поверхности резания, причем k — параметр формы режущей кромки $B_{ин}C_{ин}$. Для удаления всего припуска инструмент должен сделать серию движений, а его режущая кромка при этом создаст семейство поверхностей резания, где каждая последующая поверхность смещена относительно предыдущей вследствие движения подачи (рис.1.2, б). При решении вопросов формообразования движением подачи пренебрегают.

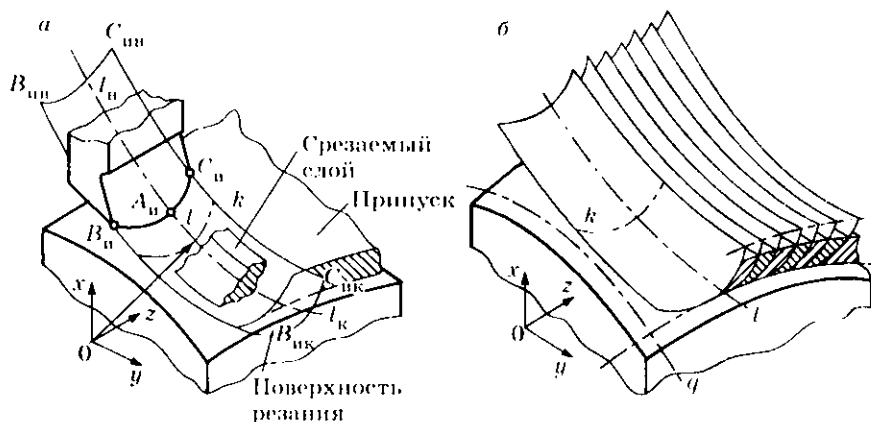


Рис.1.2. Схема образования поверхности резания на детали

С геометрической и кинематической точек зрения формообразование номинальной поверхности детали поверхностями резания возможно при выполнении следующих условий: 1) в каждой

точке контакта этих поверхностей к ним можно провести общую касательную плоскости; 2) поверхность резания не должна пересекать поверхность детали на всем протяжении последней.

В теории производящих поверхностей при обработке винтовой поверхности дисковым инструментом в качестве криволинейных координат n и q номинальной поверхности детали выбирают соответственно профиль в торцовом сечении и винтовые линии. Поскольку номинальная поверхность детали является огибающей однопараметрического семейства поверхностей резания, на условия формообразования влияют три параметра инструмента:

1) заданное движение резания, как функция координат n и q (выбирается положение оси вращения инструмента относительно детали);

2) подача инструмента, определяемая формой винтовых линий (q);

3) профиль поверхности резания, рассчитываемый как функция координат n и q . При этом поверхность резания совпадает с производящей поверхностью дисковой фрезы.

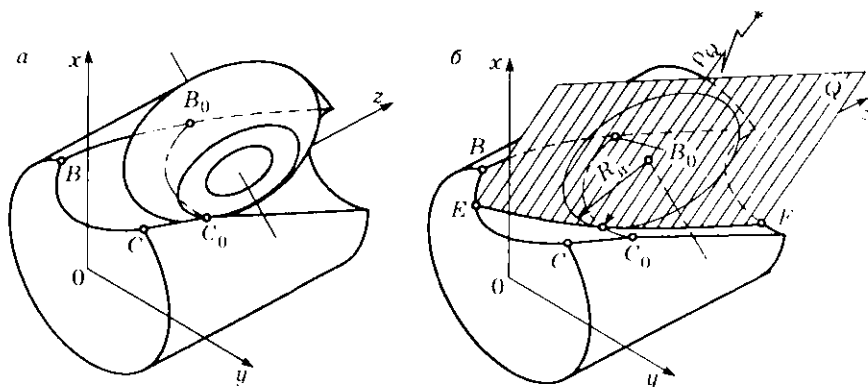


Рис.1.3. Сопряжение производящей поверхности дисковой фрезы с винтовой поверхностью детали

В ходе фрезерования в каждый момент времени производящая поверхность инструмента и винтовая поверхность детали соприкасаются по линии B_0C_0 (рис.1.3, а). При движении подачи линия касания будет перемещаться вдоль винтовых линий и придавать винтовой поверхности требуемый профиль. При этом должны быть выдержаны следующие условия:

1) в каждом сечении плоскостью Q , перпендикулярной оси инструмента, окружность сечения производящей поверхности и

кривая EF сечения винтовой поверхности должны иметь общую касательную (рис.1.3, б);

2) в каждом сечении плоскостью Q радиус R_n окружности сечения производящей поверхности должен быть меньше или, в крайнем случае, равен радиусу ρ_Q кривизны кривой EF сечения винтовой поверхности;

3) производящая поверхность инструмента не должна пересекать номинальную поверхность детали.

Перечисленные условия обеспечиваются за счет правильной установки инструмента относительно детали.

При определении профиля дисковой фасонной фрезы требуется для каждой его узловой точки рассчитать значения радиуса R_n , координаты точки вдоль оси фрезы z_n и профильный угол σ_n — угол между следами плоскости, касательной к профилю в данной узловой точке, и плоскости, перпендикулярной к оси фрезы.

1.1.2. РАСЧЕТ ТОРЦОВЫХ СЕЧЕНИЙ ВИНТОВЫХ КАНАВОК

Торцовое сечение спирального сверла. Для определения профиля торцового сечения сверла необходимы следующие данные: диаметр сверла D ; главный угол сверла в плане ϕ_r ; угол наклона винтовой канавки ϕ ; диаметр сердцевины d_0 ; центральный угол стружечной канавки ψ_k ; высота ленточки сверла g .

Профиль стружечной канавки спирального сверла очерчивается участками BK и CK (рис.1.4). Участок BK является профилем линейчатой винтовой поверхности, образованной винтовым движением прямой BK' , совпадающей с главной режущей кромкой сверла BG . Участок CK принимается в виде дуги окружности, центр которой находится на линии OK , проходящей через конечную точку K кривой BK . Точка K является точкой касания кривых BK и CK с окружностью сердцевины d_0 , лежащей в исходной плоскости $S-S$. Ось Z системы координат детали совпадает с осью сверла, ось Y параллельна главной режущей кромке сверла BK . Вспомогательные параметры и параметры профиля определяются в следующей последовательности:

- 1) шаг винтовой канавки $P = \pi D \operatorname{tg} \phi$;
- 2) винтовой параметр $p = P/2\pi$;
- 3) толщина сердцевины в исходном сечении

$$d_0 = k_0 + 0,008 D \operatorname{ctg} \phi_r;$$

где 0,008 — коэффициент, учитывающий утолщение сердцевины; в большинстве случаев этим утолщением можно пренебречь;

4) вспомогательные углы (см. рис.1.4)

$$\sin \nu_0 = d_0 / D; \quad \delta_0 = \frac{D \cos \nu_0 \operatorname{ctg} \varphi_c}{2\rho}; \quad \beta = \nu_K + \nu_0 + \delta_0 - \frac{\pi}{2};$$

5) радиус окружности для вспомогательного участка канавки КС

$$\rho = \frac{D^2 - 2Dd_0 \cos \beta + d_0^2}{4(D \cos \beta - d_0)};$$

6) расстояние между осью сверла и центром вспомогательной окружности $L = \rho + d_0/2$;

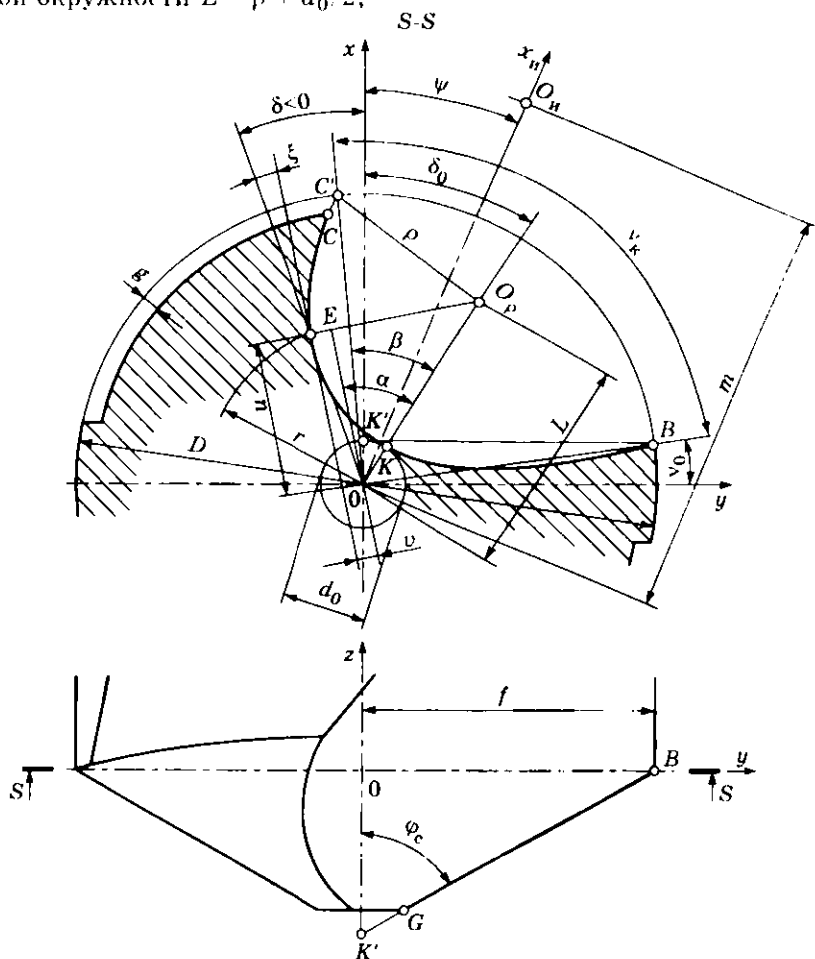


Рис.1.4. Схема определения параметров r, δ, ξ профиля стружечной канавки спирального сверла

7) Значения углов δ между радиусами и осью X , углов ξ между радиусами и касательными к профилю для участка BK можно получить, задаваясь радиус-векторами r_i для точек, принадлежащих этому участку:

$$\sin v_i = d_0 / 2r_i; \delta_i = \pi / 2 + v_i + \delta_0 - (r_i \operatorname{ctg} \varphi_c \cos v_i) / \rho;$$

$$\operatorname{tg} \xi_i = \operatorname{tg} v_i + \frac{r_i \operatorname{ctg} \varphi_c}{\rho \cos v_i}.$$

На практике достаточно рассматривать точку B , лежащую на периферии сверла ($r_B = D/2$), точку K , лежащую на сердцевине сверла ($r_K = d_0/2$), и точку F в средней части режущей кромки: $r_F = (0,25-0,3)D$.

Для участка KC обычно рассматривают точки C и E , которые лежат на пересечении вспомогательного участка и оси x . В этом случае

$$\sin \alpha_C = \frac{L^2 + \rho^2 - (D/2 - g)^2}{2\rho L};$$

$$\sin \alpha_E = \rho / L; u_i = L \cos \alpha_i; v_i = \rho / L \sin \alpha_i;$$

$$\operatorname{tg} \xi_i = v_i / u_i; \delta_i = \delta_0 - \alpha_i - \xi_i; r_i = u_i / \cos \xi_i.$$

Пример расчета приведен в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Значения r , δ , ξ для сверла $D = 40$ мм

Дано: $D = 40$ мм; $\varphi_c = 59^\circ$; $\omega = 33$; $d_0 = 5,90$ мм; $v_K = 90$; $g = 1,25$ мм						
Вспомогательные величины						
$\rho = 30,79648$ мм; $\sin v_0 = 0,1475$; $\delta_0 = 0,38595$; $\beta = 0,53399$;						
$r = 10,76466$ мм; $L = 13,71466$ мм						
Значения r , δ , ξ в расчетных точках участка BK						
Точка профиля канавки	r , мм	$\sin v$	δ	$\operatorname{tg} \xi$		
B	20,00	0,1475	1,42276	0,24359	0,21061	
F	10,00	0,2950	1,47087	0,10455	0,10417	
K	2,95	1,0	0,38625		1,5708	
Значения r , δ , ξ в расчетных точках участка CK						
Точка профиля канавки	α , град.	u , мм	v , мм	$\operatorname{tg} \xi$	ξ	r , мм
E	51°42'42"	8,4979	0	0	0	8,4979
C	9°16'32"	13,5353	12,9753	0,9586	0,7643	18,7500

Торцовое сечение фрезы с параболическим зубом. Известно, что из соображений технологичности спинку зуба фрезы описывают вместо параболы дугой окружности. Исходными данными

для расчета в этом случае являются (рис.1.5): диаметр фрезы D ; число зубьев z ; глубина стружечной канавки h ; главный передний угол γ_N ; угол наклона касательной к спинке зуба α_c ; радиус дна канавки ρ ; ширина фаски для последующей заточки фрезы f ; угол наклона винтовой канавки ω .

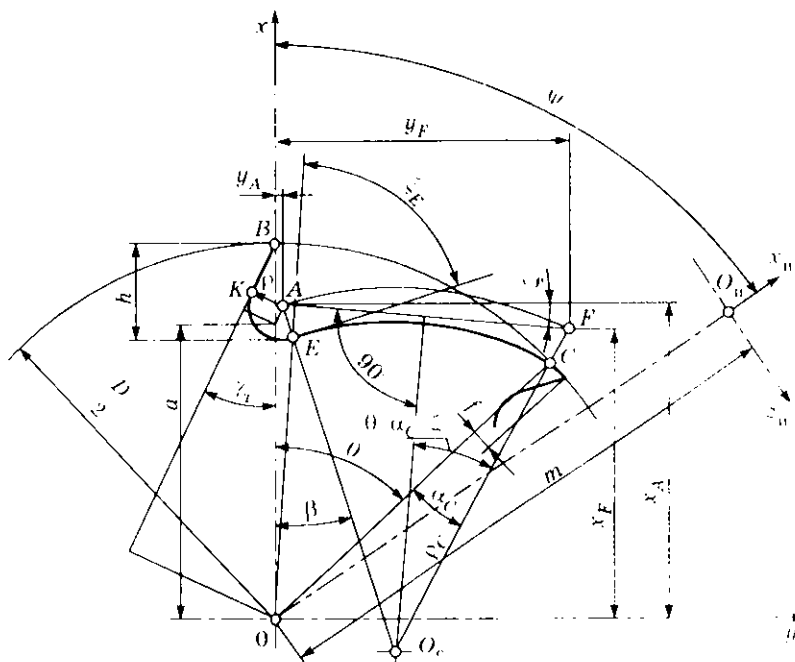


Рис.1.5. Схема определения параметров r , δ , ξ профиля стружечной канавки фрезы с параболической формой зуба

Профиль стружечной канавки фрезы состоит из трех участков: прямолинейного BK , являющегося профилем передней поверхности зуба фрезы; спинки зуба CE ; дуги EK , сопрягающей спинку и переднюю поверхность. Вспомогательные параметры и параметры профиля определяются в следующей последовательности:

- 1) шаг винтовой канавки $P = \pi D \cdot \tan \omega$;
- 2) винтовой параметр $p = P / 2\pi$;
- 3) торцовый передний угол $\tan \gamma_t = \tan \gamma_N \cdot \cos \omega$;
- 4) центральный угол между точками B и C

$$\theta = \frac{2\pi}{z} - \frac{2f}{D};$$

5) координаты центра A радиуса дна канавки

$$x_A = D/2 - h + \rho; \quad y_A = (\rho - h) \operatorname{tg} \gamma_T + \rho \cos \gamma_T;$$

6) координаты точки F пересечения прямой, проведенной из центра O_c радиуса спинки ρ_c в точку C и дуги окружности радиуса $(\rho_c + \rho)$, проведенной из того же центра:

$$x_F = 0,5D \cos \theta + \cos(\theta - \alpha_C); \quad y_F = 0,5D \sin \theta + \sin(\theta - \alpha_C);$$

7) угол наклона хорды AF к оси Y : $\operatorname{tg} \xi = (x_A - x_F) / (y_F - y_A)$;

8) угол между осью X и линией AO_c : $\beta = \theta - \alpha_C - 2\xi$;

9) координаты точки E перехода спинки в дно канавки

$$x_E = x_A - \rho \cos \beta; \quad y_E = y_A + \rho \sin \beta;$$

10) координаты точки K перехода дна канавки в переднюю поверхность

$$x_K = x_A + \rho \sin \gamma_T; \quad y_K = y_A - \rho \cos \gamma_T;$$

11) значения углов δ между радиус-векторами и осью X , а также сами радиусы можно найти, как

$$\operatorname{tg} \delta_i = y_i / x_i; \quad r_i = x_i / \cos \delta_i;$$

12) углы ξ между радиусами и касательными к профилю можно найти, как

$$\xi_B = \gamma_T; \quad \xi_K = \gamma_T - \delta_K; \quad \xi_C = \pi/2 - \alpha_C; \quad \xi_E = \pi/2 - \beta - \delta_E.$$

Пример расчета приведен в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Значения r , δ , ξ для цилиндрической фрезы [2]

Дано: $D = 75$ мм; $\alpha_C = 20^\circ$; $\omega = 45^\circ$; $h = 10$ мм; $z = 8$; $\rho = 3,5$ мм; $\gamma_N = 15^\circ$; $f = 0,5$ мм						
Вспомогательные величины						
$\rho = 37,5$ мм; $\gamma_T = 20^\circ 45'$; $\theta = 0,7720$; $x_A = 31$ мм; $y_A = 1,280$ мм; $x_F = 30,060$ мм; $y_F = 27,596$ мм; $\operatorname{tg} \xi = 0,0357$; $\beta = 0,3516$; $x_E = 27,596$ мм; $y_E = 2,4857$ мм; $x_K = 32,24$ мм; $y_K = 1,9928$ мм						
Значения r , δ , ξ в расчетных точках	Точки профиля канавки					
	B	K	C	E	A	
	δ	0	-0,0617	0,7721	0,0898	0,4130
	r , мм	37,6	32,301	37,5	27,708	33,538
	ξ	0,3622	0,4239	1,2217	1,1294	-

Торцовое сечение шнекового сверла. Параметры ряда винтовых профилей задаются на чертеже в осевом сечении. Характерным представителем таких профилей являются канавки сверл для глубокого сверления, например, шнековых. В этом случае

имеются прямолинейный радиальный участок BK , прямолинейный наклонный участок CE и участок, соединяющий их дуги, KE (рис.1.6).

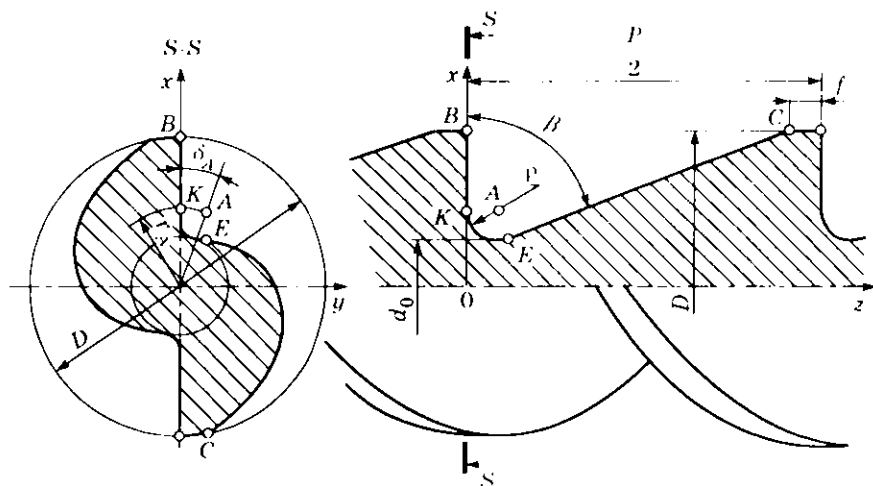


Рис.1.6. Схема определения параметров r , δ , ξ профиля стружечной канавки шнекового сверла

Исходные данные для расчета: диаметр сверла D ; диаметр сердцевинны d_0 ; радиус дна канавки ρ ; угол наклона винтовой канавки ω ; ширина ленточки f . Вспомогательные параметры и параметры профиля определяются в следующей последовательности:

- 1) шаг винтовой канавки $P = \pi D / \tan \omega$;
- 2) винтовой параметр $p = P / 2\pi$;
- 3) угол наклона участка CE

$$\tan \beta = \frac{P - 2(f + \rho)}{D - d_0 + 0,2\rho};$$

4) координаты узловых точек и углы наклона касательных к профилю в этих точках будут:

$$x_B = D/2; \quad z_{0B} = 0; \quad \varepsilon_{0B} = 0;$$

$$x_K = d_0/2 + \rho; \quad z_K = 0; \quad \varepsilon_{0K} = 0;$$

$$x_E = d_0/2 + \rho(1 + \sin \beta); \quad z_E = \rho(1 + \cos \beta); \quad \varepsilon_{0E} = \beta;$$

$$x_C = D/2; \quad z_C = P/2 - f; \quad \varepsilon_{0C} = \beta; \quad \tan \omega_A = r_A / \rho,$$

где ω_A — угол наклона касательной к винтовой линии, проходящей через точку A .

5) пересчет параметров x , z и ε_0 для каждой расчетной точки в параметры r , δ и ξ производится по формулам:

$$r_i = x_i; \delta_i = z_i / p; \operatorname{tg} \varepsilon_i = r_i \operatorname{tg} \varepsilon_0 / p.$$

Пример расчета приведен в табл.1.3.

Таблица 1.3

Значения r , δ , ξ для шнекового сверла [2]

Дано: $D = 12$ мм; $d_0 = 4,99$ мм; $p = 1,2$ мм; $\omega = 60$; $f = 0,6$ мм				
Вспомогательные величины				
$\operatorname{tg} \beta = 2,5062$; $\beta = 1,1911$; $r_A = 3,695$ мм; $\delta_A = 0,3458$; $\operatorname{tg} \omega_A = 1,0648$				
Значения r , δ , ξ в расчетных точках	Точки профиля канавки			
	B	K	E	C
r , мм	6,00	3,695	2,5805	6,00
δ	0	0	0,4740	2,9640
ξ	0	0	1,0783	1,3440

1.1.3. РАСЧЕТ ПОЛОЖЕНИЯ ДИСКОВОЙ ФРЕЗЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ЗАГОТОВКИ

Положение дисковой фрезы относительно заготовки должно обеспечить:

— формирование всего профиля канавки без переходных кривых и подрезания;

— возможно более плавный профиль фрезы, уменьшающий изменения заднего угла вдоль режущей кромки;

ширину фрезы, удовлетворяющую требованиям ее прочности и жесткости. Положение оси фрезы характеризуется межосевым расстоянием a , углом скрещивания осей ε и углом поворота профиля ψ .

Можно выделить два варианта расчета параметров установки. В первом случае отсутствует конкретно заданный радиус дна канавки, например, у спирального сверла. Тогда:

$$a \approx (D_\phi + d_0) / 2; \psi = 25 \dots 45^\circ; \operatorname{ctg} \varepsilon = D \cos \xi_B / 2p,$$

где D_ϕ — диаметр фрезы; d_0 — диаметр сердцевинки сверла; D — диаметр сверла; ξ_B — угол между касательной к профилю и радиус-вектором, проведенным в точку B (рис.1.4); p — винтовой шаг фрезы.

Как правило, $\varepsilon = 90^\circ - \omega + (0 \dots 1)^\circ$.

Во втором случае радиус ρ дна канавки задан, например, для фрез (см. рис.1.5). Координаты центра A его дуги выражаются:

$$x_A = D / 2 - h + \rho; y_A = (\rho - h) \operatorname{tg} \gamma_T + \cos \gamma_T;$$

$$\operatorname{tg} \delta_A = y_A / x_A; r_A = x_A \cos \delta_A; \operatorname{tg} \omega_A = r_A / p.$$

где ω_A — угол наклона касательной к винтовой линии, проходящей через точку A .

Тогда межосевое расстояние

$$a = \left[\frac{(D_{\phi} - 2\rho) \sin \omega_A}{\cos \varepsilon} + r_A \right] \cdot \frac{\operatorname{ctg} \varepsilon}{\operatorname{tg} \omega_A}.$$

Угол скрещивания осей ε находится из соотношений

$$\begin{cases} \operatorname{ctg} \varepsilon_{\max} > r_C \cos \xi_C - \rho \\ \operatorname{ctg} \varepsilon_{\max} > r_E \cos \xi_E - \rho \end{cases}$$

принимая то из них, при котором значение $r \cos \xi$ наибольшее.

Угол поворота профиля рекомендуется принимать

$$\psi = \arccos \left(\frac{\operatorname{ctg} \varepsilon}{\operatorname{tg} \omega_A} \right) + \delta_A + \frac{a}{\rho} \operatorname{tg}^2 \omega_A - \operatorname{ctg}^2 \varepsilon.$$

Здесь r, δ — полярные координаты точки; ξ — угол между касательной к профилю и направлением радиуса-вектора (угол давления).

1.1.4. РАСЧЕТ ПРОФИЛЯ ДИСКОВОЙ ФРЕЗЫ

Аналитический расчет. Координатами точек профиля дисковой фрезы являются их радиус R_n , расположение относительно оси Z_n , а также профильный угол σ_n (см. п.1.1.1). Определить их можно следующим образом.

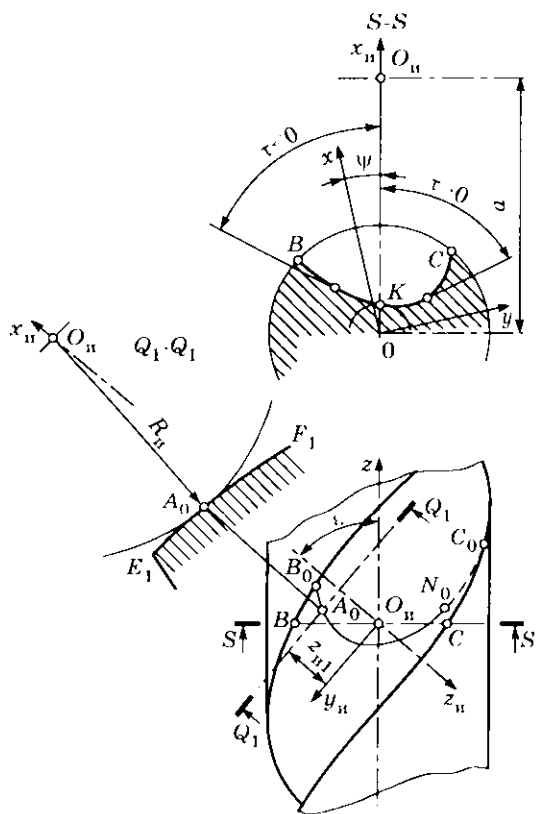
Пусть в системе координат детали $x y z$ (рис.1.7) винтовая поверхность задана уравнениями:

$$\begin{cases} x = r \cos(\delta + \varphi) \\ y = r \sin(\delta + \varphi), \\ z = \rho \varphi \end{cases}$$

где φ — угол поворота профиля винтовой поверхности относительно начального положения, а значения параметров r, δ и ξ известны для каждой расчетной точки.

Производящая поверхность дисковой фрезы связана с системой $x_n y_n z_n$ координат инструмента, положение которой относительно системы $x y z$ задано величинами a, ε и ψ . С учетом формул перехода из системы $x y z$ в систему $x_n y_n z_n$ уравнения винтовой поверхности детали преобразуются к виду

$$\begin{cases} x_n = r \cos \mu - a \\ y_n = r \sin \mu \cos \varepsilon - \rho \varphi \sin \varepsilon, \\ z_n = r \sin \mu \sin \varepsilon - \rho \varphi \cos \varepsilon. \end{cases}$$



где $\mu = \delta + \varphi = \psi$.

Производя замену переменных

$$\tau = \mu + \xi; \quad v = r \sin \xi;$$

$$u = r \cos \xi,$$

получим после ряда преобразований [2] трансцендентное уравнение для расчета угла τ , который лежит в торцовом сечении детали и измеряется между проекциями на эту плоскость оси x и касательной к профилю винтовой поверхности в точке ее касания с производящей поверхностью инструмента (рис.1.7):

$$n_2 \cos \tau = n_1 \sin \tau + n_3, \quad \tau = 0,$$

$$\text{где } n_1 = k_1 u; \quad n_2 = k_2 + u^2/p^2; \quad n_3 = \psi (uv/p^2) \delta \xi; \quad k_1 = (a + r_n) p^2; \quad r_n = p \operatorname{ctg} \epsilon; \quad k_2 = ar_n p^2.$$

Приведенное уравнение легко решается методом последовательных приближений (методом Ньютона), если за начальное значение угла τ принять

$$\tau_1 = \arccos \left(\frac{n_2 \cos \tau_0 + n_1}{n_2 + 1} \right),$$

а последующие значения искать, как

$$\tau_{n+1} = \tau_n - \frac{n_2 \cos \tau_n + n_1 - (n_3 + \tau_n) \sin \tau_n}{n_1 \cos \tau_n - n_2 \sin \tau_n}.$$

Более подробно методика расчета угла τ рассмотрена в [2]. Пример расчета точек профиля дисковой фрезы приведен в табл.1.4.

**Определение R_H , z_H профиля дисковой фрезы
для обработки канавки сверла**

Дано: $D = 20$ мм; $\varphi_c = 62^\circ 30'$; $\omega = 45$; $d_0 = 2,86$ мм; $v_c = 90$; $g = 0,6$ мм				
Вспомогательные величины, полученные при расчете профиля сверла: $\rho = 10$ мм; $v_0 = 0,1435$; $\delta_0 = 0,5115$; $\beta = 0,659$; $\rho = 6,1319$ мм; $L = 7,5619$ мм				
Значения r , δ , τ в расчетных точках (рис.1.4)	Точки профиля канавки			
	B	F	K	E
r , мм	10,00	5,00	1,43	4,1252
δ	1,4282	1,6469	0,5155	0,4302
τ	0,3644	0,0253	1,5708	0
Расчетные параметры установки фрезы и константы: $a = 32$ мм; $\gamma = 45^\circ$; $\psi = 25^\circ$; $r_H = 10$ мм; $k_1 = 0,12$; $k_2 = 3,2$				
Значения R_H , z_H профиля фрезы				
u	9,3432	4,9980	0	4,1252
v	3,5667	0,1265	1,4300	0
n_1	3,9241	2,0992	0	1,8586
n_2	4,0730	3,4498	3,2000	3,3958
n_3	0,2942	-1,1422	1,6500	0,8665
τ_1	0,2757	0,9673	1,5896	0,5689
τ	0,2802 (после двух итераций)	0,9770 (после двух итераций)	1,6047 (после двух итераций)	0,6309 (после трех итераций)
μ	0,6446	0,9517	0,0339	0,6309
φ	0,3473	0,1589	0,0453	0,2356
x_H	24,0065	29,0985	30,5715	28,4267
y_H	1,7928	-1,7555	0,2860	0,1798
R_H	24,073	29,151	30,573	28,427
z_H	6,704	4,002	0,355	3,511

Аппроксимация точного профиля дугами окружностей. Расчеты, аналогичные приведенным, могут быть выполнены для ряда промежуточных точек, достаточно близко расположенных друг от друга, после чего разрабатывается рабочий чертеж фрезы. На практике, однако, принято аппроксимировать профиль дугами окружностей (рис.1.8). Для фрез, обрабатывающих канавки спиральных сверл, наиболее распространена аппроксимация тремя дугами, для расчета которых необходимы координаты точек B , F , K и E (см. табл.1.4), а также значения профильного угла для точки F , который можно найти, как

$$\operatorname{ctg} \sigma_H = \frac{x_H \operatorname{ctg} \tau - y_H \operatorname{ctg} \varepsilon}{R_H \sin \varepsilon}$$

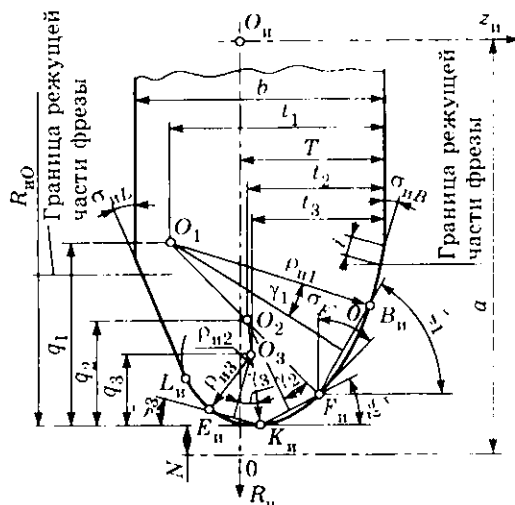


Рис.1.8. Схема замены точного профиля дисковой фасонной фрезы для обработки канавки сверла дугами окружностей

Порядок и пример расчета на основе данных табл.1.4 приведен в табл.1.5.

Таблица 1.5

Определение параметров дуг окружностей, очерчивающих профиль фрезы

№ п.п.	Формула	Результат
1	2	3
1	σ_{uF}	0,8929
2	$\zeta_1 = \arctg \frac{R_{uF} - R_{uB}}{z_{uB} - z_{uF}}$	1,0818
3	$\zeta_2 = \arctg \frac{R_{uK} - R_{uF}}{z_{uF} - z_{uK}}$	0,3718
4	$\zeta_3 = \arctg \frac{R_{uK} - R_{uE}}{z_{uK} - z_{uE}}$	0,5067
5	$\gamma_1 = \zeta_1 - \pi/2 + \sigma_{uF}$	0,4039
6	$\gamma_2 = \pi/2 + \sigma_{uF} - \zeta_2$	0,3061
7	$\gamma_3 = \zeta_2 + \zeta_3 - \gamma_2$	0,5724
8	$\rho_{u1} = \frac{z_{uB} - z_{uF}}{2 \cos \zeta_1 \sin \gamma_1}$	7,319

1	2	3
9	$\rho_{н2} = \frac{z_{нF} - z_{нK}}{2 \cos \zeta_2 \sin \gamma_2}$	6,496
10	$\rho_{н3} = \frac{z_{нK} - z_{нE}}{2 \cos \zeta_3 \sin \gamma_3}$	4,082
11	$t_1 = \rho_{н1} \sigma_{нF} + i \sin \sigma_{нF} $	9,649
12	$t_2 = t_1 - (\rho_{н1} - \rho_{н2}) \sin(\zeta_1 - \gamma_1)$	9,133
13	$t_3 = t_2 - (\rho_{н2} - \rho_{н3}) \sin(\zeta_2 - \gamma_2)$	8,880
14	$q_3 = \rho_{н3}$	4,082
15	$q_2 = q_3 + (\rho_{н2} - \rho_{н3}) \sin(\zeta_2 - \gamma_2)$	6,491
16	$q_1 = q_2 + (\rho_{н1} - \rho_{н2}) \sin(\zeta_1 - \gamma_1)$	7,132

За точкой B профиль фрезы обычно не определяют, а назначают величину перекрытия $i = 2...4$ мм (в примере расчета $i = 4$ мм). Оно оформляется отрезком касательной, проведенной в

точке B к дуге радиуса ρ . Угол наклона этого отрезка равен $\sigma_{нB} = \sigma_{нF} + 2\gamma_1$ (см. рис.1.8).

Проводя из точки $L_{н1}$ касательную к дуге радиуса $\rho_{н3}$ под углом $\sigma_{нL} \approx \zeta_3$, получаем участок профиля фрезы, формообразующий нерабочий участок профиля сверла.

Для обеспечения правильного профиля винтовой канавки необходимо рассчитать следующие параметры установки фрезы на станке относительно заготовки:

расстояние от базового торца фрезы до линии межосевого расстояния $T = z_{нB} - i \sin(\sigma_{нF} + 2\gamma_1) = 7,05$ мм;

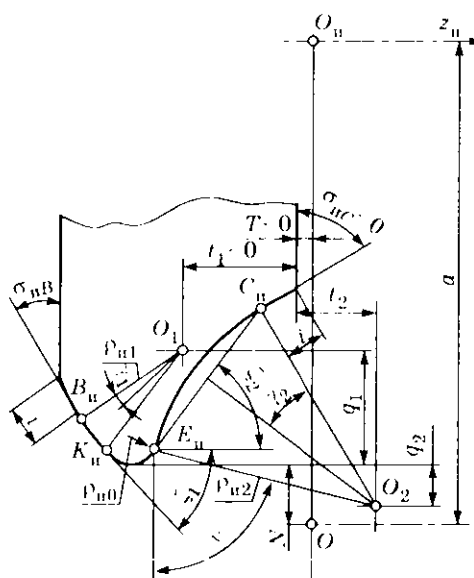


Рис.1.9. Схема замены точного профиля дисковой фасонной фрезы для обработки канавки фрезы с параболическим зубом дугами окружностей

максимальный радиус фрезы $R_{и0} = R_{иK} + \rho_{и3}[1 - \cos(\gamma_3 - \zeta_3)] = 30,582$ мм;

расстояние от оси заготовки до окружности радиуса $R_{и0}$:

$$N = a - R_{и0} = 1,418 \text{ мм.}$$

Аналогичным образом производится аппроксимация дугами окружностей профиля фрезы для обработки канавок фрез с параболическим зубом (рис.1.9). Исходными данными являются величины $R_{и}$ и $z_{и}$ для точек B , K , E и C профиля фрезы и профильные углы $\sigma_{и}$ для точек B и C . Последовательность расчетов приведена ниже:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \zeta_1 &= \frac{R_{иK} - R_{иB}}{z_{иK} - z_{иB}}; \quad \operatorname{tg} \zeta_2 = \frac{R_{иE} - R_{иC}}{z_{иE} - z_{иC}}; \\ \gamma_1 &= \pi/2 - \sigma_B - \zeta_1; \quad \gamma_2 = \zeta_2 - \sigma_C - \pi/2; \\ \rho_{и1} &= \frac{R_{иK} - R_{иB}}{2 \sin \zeta_1 \sin \gamma_1}; \quad \rho_{и2} = \frac{R_{иE} - R_{иC}}{2 \sin \zeta_2 \sin \gamma_2}; \\ z_{и1} &= \rho_{и1} \cos \sigma_{иB} + z_{иB}; \\ R_{и1} &= R_{иB} - \rho_{и1} \sin \sigma_{иB}; \quad R_{и2} = R_{иC} - \rho_{и2} \sin \sigma_{иC}; \\ \theta &= \gamma_2 + \zeta_2; \\ \rho_{и1}^2 &= (R_{иE} - R_{и1})^2 + (z_{иE} - z_{и1})^2; \\ \rho_{и0} &= 2[\rho_{и1} + (R_{иE} - R_{и1}) \cos \theta + (z_{иE} - z_{и1}) \sin \theta]; \\ t_1 &= z_{и1} - z_{иC} + i \sin \sigma_{иC}; \quad t_2 = \rho_{и2} \cos \sigma_{иC} + i \sin \sigma_{иC}; \\ q_2 &= (\rho_{и2} + \rho_{и0}) \cos \theta - \rho_{и0}; \quad q_1 = R_{и2} - R_{и1} - q_2. \end{aligned}$$

Параметры установки фрезы на станке равны:

- максимальный радиус фрезы $R_{и0} = R_{и1} + q_1$;
 - расстояние от оси заготовки до окружности радиуса $R_{и0}$
- $$N = a - R_{и0};$$

расстояние от базового торца фрезы до линии межосевого расстояния $T = z_{иC} - i \sin \sigma_{иC}$.

Аналогичным образом рассчитывается профиль фрезы для обработки канавки шнекового сверла.

1.2. ПРОФИЛИРОВАНИЕ УГЛОВЫХ ФРЕЗ

В ряде случаев угол наклона профилируемой винтовой канавки столь велик, что на универсальном оборудовании не обеспечивается правильная взаимная установка дисковой фрезы и детали. В этих случаях можно использовать другие типы фрез, например, угловые. Рассмотрим их профилирование применительно к обработке канавок шнековых сверл.

Поставленная задача является задачей проектирования режущего инструмента, предназначенного для обработки заданной поверхности детали по известной схеме формообразования. Ее решение сводится к определению возможных форм поверхностей деталей, которые могут быть обработаны при известных движениях инструмента относительно заготовки в процессе резания [6].

Примем связанную с заготовкой систему координат $X_1Y_1Z_1$ (рис.1.10). Ось X_1 направлена по оси заготовки, ось Y_1 лежит в осевой плоскости заготовки, параллельной оси фрезы. С фрезой свяжем систему координат $X_0Y_0Z_0$. В исходный момент времени ось Z_0 совпадает с осью Z_1 , а оси Y_0, Y_1, X_0, X_1 лежат в одной плоскости.

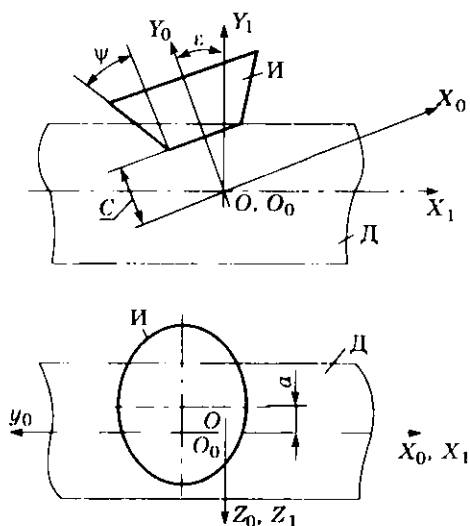


Рис.1.10. Схема фрезерования винтовой канавки угловой фрезой

Ось Y_0 идет параллельно оси фрезы. Угол между осями Y_0 и Y_1 в начальный момент времени обозначим ψ ; расстояние между осями заготовки и фрезы — α ; расстояние от начала координат до торцевой рабочей плоскости фрезы — C ; радиус фрезы в торцевой плоскости — R_f ; угол между образующей конического участка фрезы и ее осью — φ .

Обработывая винтовую поверхность, фреза совершает сложное движение относительно заготовки, которое складывается из вращения инструмента вокруг его оси и винтового движения пода-

чи вдоль оси заготовки X_1 . Параметр винтового движения подачи обозначим p . Вращаясь вокруг оси, режущие кромки фрезы описывают поверхность усеченного конуса И. Весь материал заготовки, с которым входит в контакт поверхность этого усеченного конуса, окажется срезанным. Совершая относительно заготовки винтовое движение подачи, поверхность усеченного конуса будет занимать ряд последовательных положений, огибающая к которым будет искомой винтовой поверхностью детали. Винтовое движение с параметром p можно рассматривать, как совокупность вращательного и поступательного движений. Повороту на угол φ вокруг оси X_1 будет соответствовать перемещение вдоль оси X_1 на

расстояние, равное $p\varphi$. Формулы перехода от системы $X_0Y_0Z_0$ к системе $X_1Y_1Z_1$ имеют вид:

$$\begin{cases} x_1 = x_0 \cos \varepsilon - y_0 \sin \varepsilon + p\varphi \\ y_1 = (x_0 \sin \varepsilon + y_0 \cos \varepsilon) \cos \varphi - z_0 \sin \varphi \\ z_1 = (x_0 \sin \varepsilon + y_0 \cos \varepsilon) \sin \varphi + z_0 \cos \varphi \end{cases}$$

Уравнение конической поверхности II в системе $X_0Y_0Z_0$:

$$\begin{cases} x_0 = R \sin \theta \\ y_0 = \frac{R - R_\Phi}{\operatorname{tg} \psi} + C \\ z_0 = R \cos \theta - a \end{cases}$$

где R — радиус поверхности II в произвольном сечении, перпендикулярном оси фрезы; θ — угол, отсчитываемый от плоскости Y_0Z_0 до осевой плоскости фрезы, проходящей через исследуемую точку конической поверхности.

Для конической поверхности II уравнение контакта $Nv = 0$, где N — вектор нормали к поверхности детали, v — скорость произвольной точки конической поверхности. В нашем случае после некоторых преобразований, которые приведены в [6], получим:

уравнение конической поверхности в векторной форме

$$\rho = iR \sin \theta + j \left[\frac{R - R_\Phi}{\operatorname{tg} \psi} + C \right] + k(R \cos \theta - a),$$

вектор нормали

$$N = iR \operatorname{tg} \psi \sin \theta - jR + kR \operatorname{tg} \psi \cos \theta;$$

скорость произвольной точки конической поверхности

$$v = i[p \cos \varepsilon - \sin \varepsilon (R \cos \theta - a)] + j[p \sin \varepsilon + \cos \varepsilon (R \cos \theta - a)] + k \left[\frac{R - R_\Phi}{\operatorname{tg} \psi} + C \right] \cos \varepsilon + R \sin \theta \sin \varepsilon.$$

После ряда преобразований получим уравнение контакта

$$\sin \theta (a \operatorname{tg} \varepsilon + \rho) + \cos \theta \left(R \operatorname{tg} \psi + \frac{R - R_\Phi}{\operatorname{tg} \psi} + C \right) - \operatorname{tg} \psi (a - \rho \operatorname{tg} \varepsilon).$$

Оно совместно с уравнениями конической поверхности и формулами преобразования координат выражает искомую винтовую поверхность, сопряженную с конической поверхностью фрезы. Решая рассматриваемую систему уравнений в ниже следующей последовательности, можно найти осевое сечение $z_1 = 0$ винтовой поверхности:

1) в пределах заданного участка конической поверхности подсчитываем y_0 по формуле

$$y_0 = \frac{R - R_{\Phi}}{\operatorname{tg} \psi} + C; \quad (1.1)$$

2) из уравнения контакта находим угол θ по соотношениям

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{a \operatorname{tg} \varepsilon + p}{a \operatorname{tg} \psi + y_0}; \quad \cos \tau = \frac{(a - p \operatorname{tg} \varepsilon) \operatorname{tg} \psi}{R \operatorname{tg} \psi + y_0} \cos \eta; \quad \theta = \eta + \tau; \quad (1.2)$$

3) рассчитываем координаты точек контакта на конической поверхности

$$x_0 = R \sin \theta; \quad z_0 = R \cos \theta - a; \quad (1.3)$$

4) по формулам преобразования координат, определив координаты осевого сечения поверхности детали из уравнения $z_1 = 0$, получим

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{z_0}{x_0 \sin \varepsilon + y_0 \cos \varepsilon}; \quad (1.4)$$

5) находим координаты точек осевого сечения

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 \cos \varepsilon - y_0 \sin \varepsilon + p \varphi; \\ y_1 &= (x_0 \sin \varepsilon + y_0 \cos \varepsilon) \cos \varphi + z_0 \sin \varphi. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Граничные точки характеристик (кривых контакта конической поверхности И и поверхности детали Д) и соответственно граничные точки профиля винтовой поверхности, сопряженные с заданным участком конической поверхности, определяются по приведенным зависимостям, для случая, когда $y_0 = C$ и $R = R_{\Phi}$.

Наряду с коническим участком поверхности И поверхность детали может формировать и торцовая плоскость инструмента, уравнение которой $y_0 = C$ и тогда $\psi = 90^\circ$.

Следовательно, уравнение контакта в этом случае примет вид

$$R \cos \theta \cos \varepsilon = a \cos \varepsilon - p \sin \varepsilon.$$

Отсюда

$$\cos \theta = \frac{a - p \operatorname{tg} \varepsilon}{R_{\Phi}}.$$

Координаты точек контакта на торцовой плоскости фрезы

$$y_0 = C; \quad z_0 = -p \operatorname{tg} \varepsilon. \quad (1.6)$$

Эти уравнения описывают две плоскости, на пересечении которых располагаются точки характеристики, т.е. точки контакта поверхностей И и Д. Реальный участок характеристики лежит в пределах торца фрезы. Координата граничных точек характеристики

$$x_0 = +R_{\Phi} \cos \beta, \quad (1.7)$$

где

$$\sin \beta = \frac{ptg \varepsilon - a}{R_{\phi}}$$

По формулам преобразования координат при известной характеристике находится профиль винтовой эвольвентной поверхности детали, сопряженной с торцовой плоскостью инструмента. Анализ показывает, что граничные точки характеристик на торцовой плоскости и коническом участке поверхности II не совпадают друг с другом. Имеет место разрыв характеристик на границе участков. Это означает, что часть поверхности канавки обрабатывается границей участков, т.е. окружностью радиуса R_{ϕ} , расположенной на торце инструмента в сечении $y_0 = C$.

Если в точках характеристик наблюдается касание конической поверхности и торцовой плоскости с поверхностью детали, то в точках граничной окружности радиуса R_{ϕ} имеет место кромочное соприкосновение обработанной поверхности и тела вращения, ограниченного поверхностью II.

Уравнение граничной окружности радиуса R_{ϕ} в системе $X_0Y_0Z_0$ выражается двумя равенствами: $y_0 = C$; $x_0^2 + (z_0 + a)^2 = R_{\phi}^2$.

Эта окружность, совершая винтовое движение, описывает искомую часть винтовой канавки.

Пример. Определить профиль угловой фрезы для обработки канавки шнекового сверла. Исходные данные: диаметр сверла $D = 20$ мм; $\omega = 60^\circ$; $d_0 = 7$ мм; угол наклона спинки $\alpha = 22^\circ 30'$; ширина ленточки $f = 0,5$ мм (см. рис.1.6). В данном случае шаг винтовой канавки $P = \pi D / \operatorname{tg} \omega = 36,276$ мм, винтовой параметр $p = P / 2\pi = 5,774$ мм.

Определим параметры установки a , C и ε угловой фрезы, приняв ее диаметр $D_{\phi} = 90$ мм, $\psi = 15^\circ$.

При обработке торцовым участком угловой фрезы необходимо получить поверхность, которая в осевом сечении имела бы наклон $\alpha = 22^\circ 30'$ и крайняя точка K сечения имела бы координату $y_K = 3,5$ мм (см. рис.1.6).

Результаты расчета нескольких вариантов установки фрезы приведены в табл.1.6.

Таблица 1.6
Расчет параметров установки фрезы ($\varepsilon = 22^\circ$; $R = 45$ мм)

№ п/п	a , мм	C , мм	α , град.	y_K , мм
1	2	3	4	5
1	10	20,5	22,14	3,34
2	15	20,0	22,50	3,32
3	20	20,0	22,43	3,83

Продолжение таблицы 1.6

1	2	3	4	5
4	25	22,0	22,25	6,28
5	25	19,0	22,46	3,84
6	30	18,0	22,46	4,11
7	22	18,0	22,15	3,38
8	21	19,5	22,48	3,58

Из табл.1.6 видно, что несколько параметров установки удовлетворяют поставленному условию. Поэтому необходимо проверить выполнение второго условия: длина стружечной канавки в осевом сечении $l = P/2 - f = 17,34...17,64$ мм.

Данное условие можно проверить, выполнив графические построения кривых, получаемых при обработке точкой граничной окружности радиуса $R_{\text{ф}}$ для выбранных вариантов установки. В данном случае подходят варианты установки №2, 3, 5, 8. На рис.1.11 изображены результаты расчетов и построения по данным табл.1.7.

Таблица 1.7

Результаты расчета координат точек осевого сечения поверхности, получаемой при обработке точками граничной окружности угловой фрезы для различных вариантов установки

Номер варианта установки	a , мм	C , мм	α , град.	y_0 , мм	x_0 , мм	θ , град.	y , мм	x , мм
2	15	20	22,50	3,32	43,00	80	7,44	41,01
						70	2,73	47,13
						60	8,47	48,94
3	20	22	22,43	3,83	42,08	80	12,32	40,42
						70	5,34	40,69
						60	4,67	46,80
						50	10,50	45,27
5	25	19	22,46	3,84	39,39	70	9,77	38,30
						60	3,91	39,20
						45	8,88	41,60
						40	11,60	39,80
8	21	19,51	22,48	3,59	41,19	60	3,79	45,78
						53	7,63	45,90
						50	9,46	45,00

Из построений (см. рис.1.11) видно, что только одному варианту установки (№5) соответствует выполнение обоих условий. Данные параметры установки принимаем в качестве окончательных для дальнейшего проектирования.

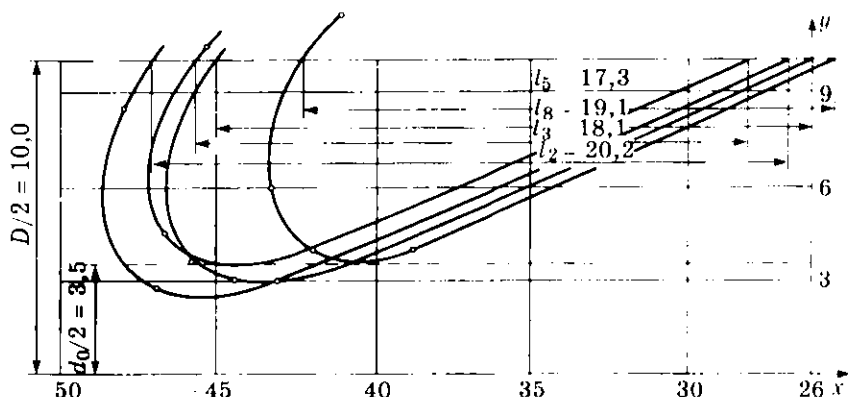


Рис.1.11. Пример графического определения длины стружечной канавки l для различных вариантов установки фрезы

Произведем расчет координат точек осевого сечения винтовой канавки шнекового сверла при выбранных параметрах установки и размерах угловой фрезы.

Координаты точек осевого сечения участка винтовой поверхности, обработанного конической поверхностью фрезы, определим, рассматривая семь секущих плоскостей: y_0 — 19; 20; 22; 24; 26; 28 и 30 мм. Радиус фрезы в этих плоскостях рассчитывается по формуле (1.1):

$$R = R_0 + (y_0 + C) \operatorname{tg} \psi.$$

Далее найдем для каждого сечения, при каком угле поворота θ происходит контакт конической поверхности инструмента и поверхности детали (1.2). Координаты x_0 , z_0 точек контакта на конической поверхности рассчитываются по формулам (1.3). Координаты x_1 , y_1 точек осевого сечения участка винтовой поверхности, образованного конической поверхностью фрезы, рассчитывают по формулам (1.4), (1.5). Результаты расчета приведены в табл.1.8.

Наряду с коническим участком винтовую поверхность детали на определенном ее участке формирует граничная окружность. В системе координат $x_0 y_0 z_0$ координаты точек граничной окружности рассчитываются по формулам:

$$\begin{cases} x_0 = R \sin \theta \\ y_0 = C \\ z_0 = R \cos \theta - a \end{cases}$$

Таблица 1.8

Результаты расчетов координат точек осевого сечения участка винтовой поверхности канавки шнекового сверла, обработанного конической поверхностью угловой фрезы

($R_\phi = 45$ мм; $\psi = -15^\circ$; $p = 5,774$ мм; $a = 25$ мм; $C = 19$ мм; $\varepsilon = 22^\circ$)

y_0 , мм	R , мм	η , град.	τ , град.	θ , град.	x_0 , мм	z_0 , мм	x_1 , мм	z_1 , мм
19	45,000	66,379	65,363	131,732	33,582	54,954	30,188	62,704
		246,379	114,647	1,026	0,806	19,993	11,221	26,847
20	44,732	63,420	65,979	129,400	34,566	53,393	30,999	61,522
		243,420	114,020	357,440	1,998	19,687	13,949	25,925
22	44,198	59,941	67,309	125,251	36,092	50,508	32,226	59,334
		239,941	112,690	350,631	7,195	18,606	18,955	23,850
24	43,660	53,046	68,670	121,716	37,140	47,952	33,029	57,389
		233,046	111,329	344,375	11,759	17,046	23,283	21,567
26	43,124	48,708	70,002	118,709	37,822	45,715	33,513	55,679
		228,708	109,998	338,706	15,660	15,180	26,904	19,196
28	42,588	44,878	71,266	116,144	38,231	43,765	33,759	54,180
		224,878	108,733	333,611	18,929	13,150	29,840	16,844
30	42,052	41,501	72,445	113,947	38,432	42,068	33,830	52,864
		221,501	107,554	329,055	21,624	11,060	32,136	14,595

В нашем случае θ изменяется от $+1,026^\circ$ до $+131,732^\circ$. Профиль винтовой поверхности детали при ее образовании граничной окружностью по известным координатам x_0 , y_0 , z_0 рассчитывается по формулам преобразования координат при условии, что $z_1 = 0$.

Результаты расчетов приведены в табл.1.9.

Таблица 1.9

Результаты расчета координат точек осевого сечения поверхности, получаемой при обработке точками граничной окружности угловой фрезы (исходные данные см. в табл.1.8)

θ , град.	x_0 , мм	z_0 , мм	x_1 , мм	y_1 , мм
1	2	3	4	5
1,026	-0,786	19,993	12,793	26,464
10,000	-7,814	19,316	19,678	24,267
20,000	16,391	17,286	26,987	20,959
30,000	22,500	13,971	33,690	16,721
40,000	28,925	9,472	39,419	11,649
50,000	34,472	3,925	43,098	6,126
60,000	38,971	2,450	39,256	3,919
70,000	42,286	-9,609	38,310	9,772
80,000	44,316	17,189	39,478	17,212
90,000	45,000	25,000	39,946	25,011
100,000	44,316	32,814	39,316	32,830

Продолжение таблицы 4.16

1	2	3	4	5
110,000	42,286	40,391	37,508	40,430
120,000	38,971	47,500	34,577	47,596
131,730	33,962	54,523	30,054	54,742
1,026	0,785	19,993	11,241	26,842
10,000	7,814	19,316	4,230	28,199
20,000	15,391	17,286	3,477	29,078
30,000	22,500	13,971	10,901	29,556
40,000	28,925	9,472	17,846	29,987
60,000	34,472	3,925	24,106	30,781
50,000	38,971	2,500	29,463	32,312
70,000	42,286	-9,609	33,704	34,810
80,000	44,316	-17,186	36,659	38,291
90,000	45,000	-25,000	38,228	42,584
100,000	44,316	-32,814	38,389	47,409
110,000	42,286	-40,391	37,165	52,448
120,000	38,971	-47,500	34,644	57,394
131,730	33,962	54,522	30,509	62,395

В формировании профиля винтовой поверхности детали принимает участие также торцовая плоскость инструмента. Координаты x_0 , y_0 , z_0 точек контакта торцевой плоскости и поверхности детали находятся по формулам (1.6), (1.7).

$$y_0 = 19 \text{ мм}; z_0 = 5,744 \text{tg} 22^\circ = 2,333 \text{ мм};$$

$$\sin \beta = (5,744 \text{tg} 22^\circ + 25) \cdot 45 = 0,504;$$

$$\beta = 30,246^\circ; x_0 = 45 \cos(30,246^\circ) = 38,874 \text{ мм}.$$

В указанных пределах значение координат x_0 можно выбирать произвольно. По известным координатам x_0 , y_0 , z_0 можно найти координаты x_1 , y_1 точек осевого сечения винтовой поверхности детали при $z_1 = 0$. Результаты расчетов приведены в табл.1.10.

Таблица 1.10

Результаты расчета координат точек осевого сечения поверхности, получаемой при обработке точками торцевой поверхности угловой фрезы (исходные данные см. в табл.1.8, 1.9)

x_0 , мм	x_1 , мм	y_1 , мм	x_0 , мм	x_1 , мм	y_1 , мм
38,874	28,598	32,264	-10,000	17,362	14,086
38,000	27,693	31,934	-20,000	24,969	10,390
36,000	26,829	31,190	-30,000	32,814	6,792
34,000	23,964	30,442	-32,000	34,296	6,093
32,000	22,098	29,696	-34,000	36,629	5,400
30,000	20,232	28,949	-36,000	37,248	4,744
20,000	10,892	25,217	-38,000	38,826	4,108
10,000	1,626	21,489	-38,874	-39,103	3,843

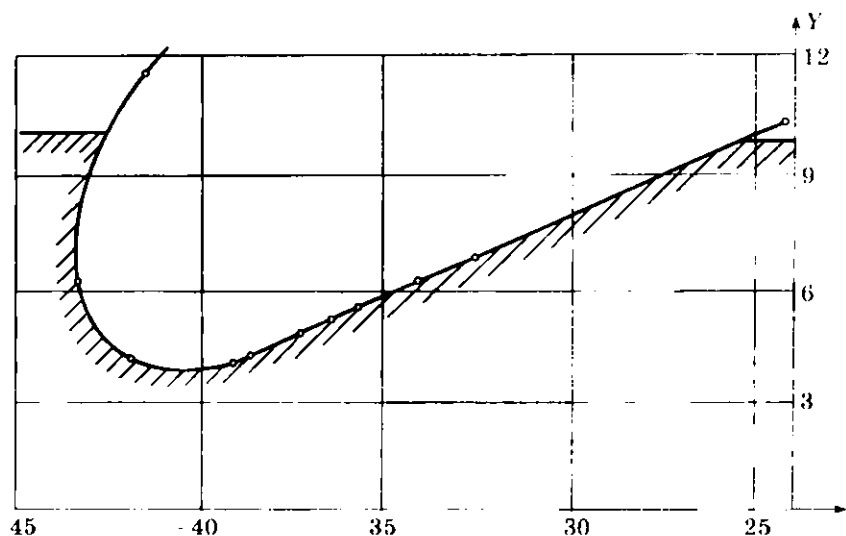


Рис.1.12. Расчетный профиль осевого сечения канавки шнекового сверла после обработки угловой фрезы

Построенный по вычисленным координатам профиль осевого сечения винтовой канавки шнекового сверла приведен на рис.1.12.

1.3. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДИСКОВЫХ ФАСОННЫХ И УГЛОВЫХ ФРЕЗ

Проектирование дисковых фасонных и угловых фрез осуществляется в следующей последовательности.

1. В качестве инструментального материала используют сталь Р6М5.

2. Выбирают геометрию фрезы. Передний угол обычно принимают равным 0, чтобы избежать трудоемких коррекционных расчетов. Задний угол для фасонных фрез обычно равен 12°, угловых — 16(8)°. Цифра в скобках — для вспомогательных задних углов.

При выборе заднего угла следует учесть, что в произвольной i -й точке профиля

$$\operatorname{tg} \alpha_i = (D - D_i) \operatorname{tg} \alpha \sin(\varepsilon_i + \tau),$$

где D — наружный диаметр фрезы; ε_i — угол между касательной к профилю в i -й точке и торцевой плоскостью; τ — угол поворота суппорта при косом затывании.

Решение о косом затыловании принимается, если $\alpha_f = 3 \dots 4^\circ$.

3. Выполняют расчет режима резания (t , S_z и др.).

4. Выбирают диаметр оправки фрезы. Для дисковых фасонных фрез рекомендуется $d = 14,2h_{\text{ш}} + 0,373$, где $h_{\text{ш}}$ — глубина профиля детали.

Для угловых фрез можно воспользоваться формулой

$$D_{\text{min}} \approx 0,12B^{0,25}t^{0,09}S_z^{0,06}l^{0,75}y_{\text{max}}^{0,25} + 2(t' + \Lambda),$$

где B — ширина фрезерования; t , S_z — максимальные глубина фрезерования и подача; z — число зубьев; l — расстояние между опорами оправки или вылет фрезы относительно шпинделя; y_{max} — максимально допустимый прогиб оправки (0,2 и 0,1 мм соответственно при чистовом и черновом фрезеровании); t' — общая глубина паза или уступа; Λ — 10 мм — зазор между оправкой и поверхностью заготовки.

Полученное значение округляют до ближайшего стандартного. Здесь же находим параметры шпоночного паза.

5. Выбирают диаметр и ширину фрезы. Наружный диаметр можно найти из соотношений

$$D = D_1 + 2H; D_1 = (1,6 \dots 2)d; H = h_{\text{ф}} + K + r; K = (\pi D / z) \lg \alpha,$$

где $D_1 = (1,6 \dots 2)d$ — диаметр окружности, проведенный через основание впадины; H — высота зуба; $h_{\text{ф}} = h_{\text{ш}} + 1 \dots 3$ мм — высота профиля фрезы; K — величина затылования; r — 1...3 мм — радиус закругления впадин; z — число зубьев. Толщина ступицы при этом должна соответствовать

$$a = (D - d - 2H) / 2 \geq 0,4d.$$

Ширина фрезы $B = b + 2$ с последующим округлением по ряду предпочтительных чисел.

В посадочном отверстии может быть предусмотрен карман, ширина посадочных шеек $l = B - 4 = 12$ мм.

6. Выбирают число зубьев. Ориентировочно $z = (1,8 \dots 2,2)D/H$ для фрез с прямой стружечной канавкой и $z = (2,2 \dots 2,8)D/H$ для фрез с усиленной формой зуба. В последнем случае дно стружечной канавки должно отстоять от режущей кромки на расстоянии $H_2 = K + r + 1 \dots 4$.

7. Выбирают форму и размеры зубьев и стружечных канавок. Угол впадины θ выбирается, исходя из условий свободного выхода затыловочного резца. Полному обороту затыловочного кулачка соответствует поворот фрезы на угол $360^\circ / z$. Поскольку холостой ход обычно соответствует повороту кулачка на 90° , угол холостого хода резца $90^\circ / z$. С учетом углов врезания и перебега

резца ($2...3^\circ$) и угла, определяющего прочность сточенного до предела зуба (15°), получим угол впадины $\theta = 90/z + (15...18^\circ)$. Значение θ округляется до значений 18; 22; 25; 30° . В тех случаях, когда профиль фрезы шлифуется, используют двойное затылование с $K_1 = 1,5K$, необходимое для обеспечения выхода шлифовального круга. При этом ширина первого затылования составляет $s \approx 0,5\pi D/z$.

Глава 2

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕЭВОЛЬВЕНТНЫХ ПРОФИЛЕЙ МЕТОДОМ КОПИРОВАНИЯ

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В ряде случаев в машиностроении используют детали, зубчатый профиль которых имеет резкий переход между боковыми сторонами и внутренним цилиндром. Обработка таких деталей не может быть выполнена методом огибания (обкатки), так как в этом случае вместо резкого перехода образуется переходная кривая. Поэтому используются специальные червячные фрезы определенной установки, в которых все зубья, за исключением последнего, служат только для снятия припуска (рис.2.1, а), а последний зуб в ходе обработки оставляет «отпечаток», соответствующий окончательному профилю впадины колеса (рис.2.1, б). Для снятия припуска требуется определенное количество зубьев,

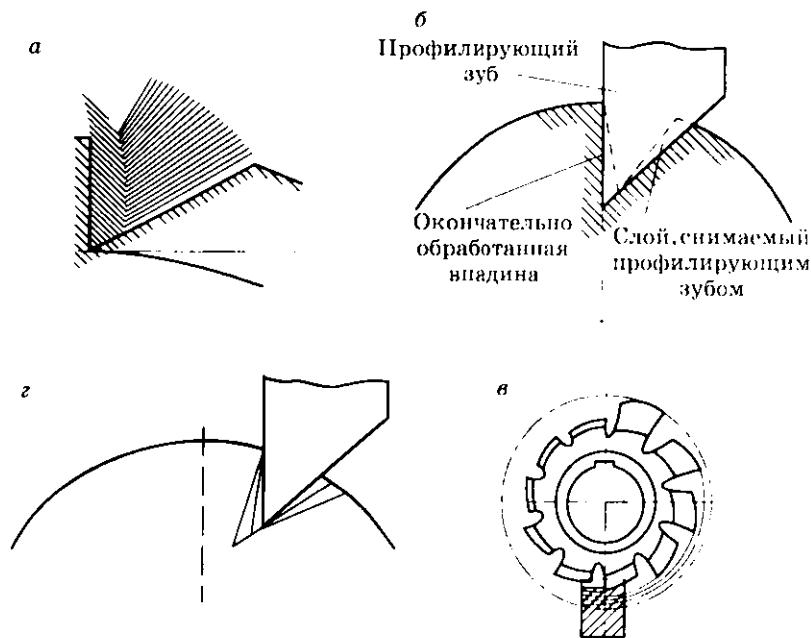


Рис.2.1. Схема обработки профиля фрезой определенной установки

причем высота каждого последующего зуба больше предыдущего (рис.2.1, в). Для того, чтобы зубья, следующие за профилирующим, не подрезали окончательно сформированный профиль (рис.2.1, г), их необходимо удалить. Такие фрезы устанавливают на шлицефрезерных станках и работают аналогично обычным червячным фрезам.

2.2. ЧЕРВЯЧНЫЕ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ШЛИЦЕВЫХ ВАЛОВ С УГЛУБЛЕННЫМ ПРОФИЛЕМ

В случае центрирования шлицев по внутреннему диаметру и отсутствия поднутрений и переходных кривых обработка осуществляется специальными червячными фрезами. При этом боковые стороны профиля формируются методом обкатки, а впадина валика по внутреннему диаметру методом копирования лезвиями, расположенными на вершине определенного зуба фрезы. Такие фрезы называются фрезами определенной установки.

Исходными данными для расчета служат параметры нарезаемого шлицевого вала (рис.2.2): наружный диаметр d_{a1} , число зубьев z_1 , внутренний диаметр d_{f1} , ширина шлица b_1 поля допусков на диаметры и ширину, размеры фаски c_1 на вершине зуба.

Тогда расчетные размеры вала будут:

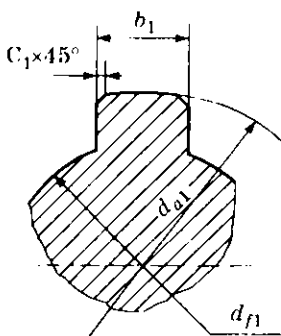


Рис.2.2. Параметры шлицевого вала с углубленным профилем

1) расчетный наружный диаметр $D_p = d_{a \max} + 2c_1$, где $d_{a \max}$ — максимальный наружный диаметр;

2) расчетный внутренний диаметр $d_p = d_{f \min} + 0,25\delta_d$, где δ_d — допуск на внутренний диаметр d_{f1} ; $d_{f \min}$ — минимальный внутренний диаметр.

Если предполагается последующее шлифование по внутреннему цилиндру, то $d_p = d_{f \max} + S_d + 0,25\delta'_d$, где δ'_d — допуск на внутренний диаметр при фрезеровании; $d_{f \max}$ — максимально допустимый внутренний диаметр; S_d — припуск на внутренний диаметр при шлифовании;

3) расчетная ширина шлица $b_p = b_{1 \min} + 0,25\delta_b$, где δ_b — допуск на ширину шлица;

$b_{1 \min}$ — минимальная ширина.

Если предполагается последующее шлифование по боковым сторонам, то $b_p = b_{1 \max} + S_b + 0,25\delta'_b$, где δ'_b — допуск на шири-

ну шлица при фрезеровании; $b_{1\max}$ - максимальная ширина шлица; S_b - припуск на ширину шлица при шлифовании.

Расчет выполняется в следующей последовательности.

1. Минимально допустимый радиус начального цилиндра с точностью расчета 0,1 мм и округлением в большую сторону

$$r_{w1} = 0,5 \cdot D_p^2 / 0,75b_p^2.$$

2. Профильный угол шлица на начальной окружности

$$\sin \gamma_{w1} = nb_p / 2r_{w1}.$$

3. Угловой параметр обкаточного движения, соответствующий обработке точки профиля шлица на окружности впадин

$$\cos \delta_{\max} = \frac{d_p^2 - b_p^2}{2r_{w1}}.$$

4. Угловые параметры, обеспечивающие наилучшую замену теоретической кривой дугой окружности:

$$\delta_1 = \gamma_{w1} + k_1(\delta_{\max} - \gamma_{w1});$$

$$\delta_2 = \gamma_{w1} + k_2(\delta_{\max} - \gamma_{w1}),$$

где $k_1 = 0,3 \dots 0,5$; $k_2 \approx 0,8$.

5. Координаты точек профиля A_i (x , y):

$$x_i = r_{w1}(\delta_i - \gamma_{w1} - \sin \delta_i \cdot \cos \delta_i) + 0,5b_p \cos \delta_i;$$

$$y_i = \sin \delta_i(r_{w1} \sin \delta_i - 0,5b_p).$$

Значения γ_{w1} и δ_i подставляются в радианах.

6. Координаты центра заменяющей окружности и ее радиус (рис.2.3):

$$x_0 = \frac{(x_2^2 + y_2^2)y_1 - (x_1^2 + y_1^2)y_2}{2(x_2y_1 - x_1y_2)};$$

$$y_0 = \frac{(x_1^2 + y_1^2)x_2 - (x_2^2 + y_2^2)x_1}{2(x_2y_1 - x_1y_2)};$$

$$\rho_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}.$$

7. Высота головки зуба червячной фрезы

$$h_{a0} = r_{w1} \sin \delta_{\max} (\sin \delta_{\max} - \sin \gamma_{w1}).$$

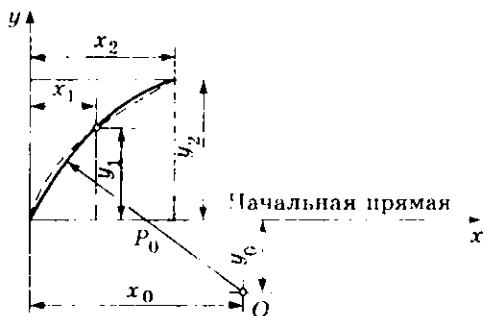


Рис.2.3. Схема замены кривой профили боковой стороны зуба дугой окружности

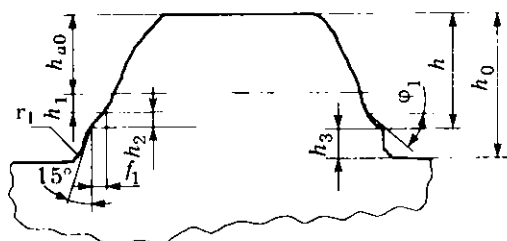


Рис.2.4. Размеры зуба червячной фрезы по высоте

8. Остальные размеры зуба по высоте (рис.2.4):
 смещение уступа от начальной прямой h_1
 $(b_p/32)r_{w1}$;
 высота уступа h_2
 $f_1 \tan \varphi$;
 ширина $f_1 - 2c_1$;
 угол уступа принимается в зависимости от числа зубьев шлифовального вала:

$$z_1 \quad 4-8 \quad \varphi \quad 35^\circ;$$

$$z_1 \quad 10-14 \quad \varphi \quad 40^\circ;$$

$$z_1 \quad 16-20 \quad \varphi \quad 45 \dots 50^\circ;$$

размеры канавки для выхода затыловочного шлифовального круга:

$$h_3 \quad 1,5 \dots 3 \text{ мм}; \quad r_k \quad 1 \dots 2 \text{ мм};$$

высота шлифованной части зуба:

$$\bullet \text{ для валов с фасками } h = h_{a0} + h_1 + h_2;$$

$$\bullet \text{ для валов без фасок } h = h_{a0} + h_1 + (0,5 \dots 1,5);$$

$$\bullet \text{ общая высота зуба } h_0 = h + h_3.$$

9. Число заходов фрезы обычно равно 1.

10. Угол подъема винтовой линии по условному среднему цилиндру принимаем $\lambda_{cp} = 2^\circ 30'$ (не более). Направление винтовой линии - правое.

11. Наружный диаметр фрезы принимается равным

$$d_{a0} = \frac{d_{w1}}{z_1 \sin \lambda_{cp}} + h_{a0}.$$

Полученное значение округляется в большую сторону до величины, кратной 5, и уточняется по паспортным данным станка.

12. Число зубьев фрезы в торцовом сечении

$$z_0 = r_{a0}(1 - z_1 + 0,1) + 2,8$$

с округлением до ближайшего целого четного числа.

13. Спад кулачка для затылования

$$K = \frac{\pi d_{a0}}{z_0} \tan \alpha_a,$$

где $\alpha_a = 10 \dots 12^\circ$ - задний угол по вершинам зубьев.

Для фрез с двойным затылованием $K_1 = (1,2...1,5)K$. Окончательно K и K_1 округляются до ближайших больших значений по стандартному ряду кулачков.

14. Глубина стружечных канавок фрез:
с нешлифованной задней поверхностью

$$H = h + K + r + (0,5...1);$$

- с шлифованной задней поверхностью

$$H = h + (K + K_1)/2 + r + (0,5...1),$$

где $r = 1...4$ — радиус дна стружечной канавки, мм.

15. Угол стружечной канавки принимается из конструктивных и технологических соображений, как и для червячных модульных фрез: 22, 25 или 30°.

16. Диаметр отверстия под оправку выбирается из соотношения

$$d_0 \leq 0,625(d_{a0} - 2H).$$

Окончательное его значение уточняется по ГОСТ 9472-83 из ряда 16; 22; 27; 32; 40 и 50 мм. Здесь же назначаются размеры шпоночного паза.

Окончательный диаметр отверстия должен удовлетворять условию

$$0,5d_{a0} - H - (C_1 - d_0/2) \geq 0,3d_0,$$

где C_1 — размер отверстия по шпоночному пазу.

17. Диаметр буртика принимается равным

$$d_6 = d_{a0} - 2H - (3...5).$$

18. Расчетный диаметр условного среднего цилиндра находится по формуле

$$D_{\text{ср.расч}} = d_{a0} - (h_0 - h_2) - 0,5K.$$

19. Расчетный угол подъема винтовой линии по условному среднему цилиндру определяется из выражения

$$\sin \lambda_{\text{ср.расч}} = \frac{2r_{w1}}{z_1 D_{\text{ср.расч}}}.$$

Для обеспечения положительного заднего угла на входных боковых сторонах зубьев должно выдерживаться соотношение

$$\operatorname{tg} \lambda_{\text{ср.расч}} \leq \operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{y_0 + 0,5h_{a0}}{x_0 - x_1} \cdot \operatorname{tg} \alpha_a.$$

20. Угол наклона стружечных канавок принимается равным

$\beta_K = \lambda_{\text{ср.расч.}}$

21. Осевой шаг передней поверхности

$$P_K = \frac{\pi D_{\text{ср.расч}}}{\operatorname{tg} \beta_K}.$$

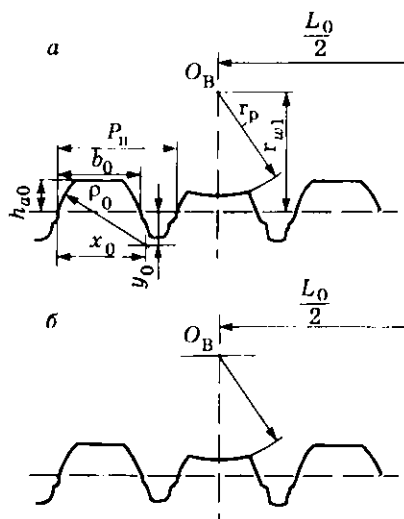


Рис.2.5. Профиль зуба червячной фрезы определенной установки: а — в нормальном сечении; б — в осевом сечении

22. Профиль фрезы в осевом сечении различен для разных зубьев. Центральный зуб, линия симметрии которого проходит через середину рабочей части, а также отдельные зубья, прилегающие к нему, имеют кольцевой профиль по дуге окружности радиусом r_p . Центр этой окружности определяется радиусом начальной окружности плечевого валика (рис.2.5). Остальные зубья имеют по вершине прямолинейный профиль.

23. Шаг зубьев в осевом сечении

$$P_0 = 2\pi r_{w1} z_1.$$

24. Шаг зубьев в нормальном сечении

$$P_n = P_0 \operatorname{tg} \lambda_{\text{ср.расч.}}$$

25. Толщина зуба по начальной прямой

$$b_0 = 2r_{w1} (\pi / z_1 - \gamma_{w1}) \cos \lambda_{\text{ср.расч.}}$$

где γ_{w1} принимается в радианах.

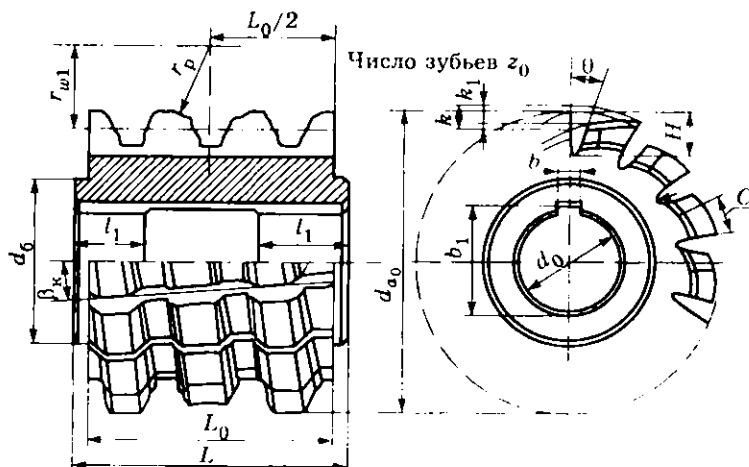


Рис.2.6. Конструктивные элементы червячной фрезы с удлиненным зубом

26. Длина рабочей части фрезы

$$L_0 = 2 \sqrt{2r_{a1}h_{a0} + h_{a0}^2} + \\ + (0,5 \dots 1,0)P_n.$$

27. Общая длина фрезы

$$L = L_0 + 2l_1,$$

где $l_1 = 2 \dots 5$ — длина цилиндрической части буртика, мм.

28. Конструктивное оформление фрезы показано на рис.2.6. Технические требования аналогичны требованиям к фрезам для обработки шлицевых валов (ГОСТ 8027—87).

2.3. ФРЕЗЫ-УЛИТКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ШЛИЦЕВЫХ ВАЛОВ С УГЛУБЛЕННЫМ ПРОФИЛЕМ

В ряде случаев в машиностроении используют детали типа шлицевых валиков глубокого профиля с прямолинейными параллельными сторонами и наличием резкого перехода между ними и внутренним цилиндром. Обработка таких деталей не может быть выполнена методом огибания (обкатки), так как в этом случае вместо резкого перехода образуется переходная кривая. Поэтому используются специальные фрезы-улитки определенной установки, последний зуб которых в ходе обработки оставляет «отпечаток», соответствующий окончательному профилю впадины колеса. Такие фрезы устанавливаются на шлицефрезерных станках и работают аналогично обычным червячным фрезам.

Методику расчета рассмотрим на конкретном примере.

Исходными данными для расчета служат параметры нарезаемого шлицевого валика (см. рис.2.2): наружный диаметр d_{a1} , число зубьев z_1 , внутренний диаметр d_{f1} , ширина шлица b_1 , поля допусков на диаметры и ширину. В цифровом примере $d_{a1} = 50 \begin{smallmatrix} 0,009 \\ 0,025 \end{smallmatrix}$, число зубьев $z_1 = 8$, внутренний диаметр $d_{f1} = 44,6 \begin{smallmatrix} 0,013 \\ 0,035 \end{smallmatrix}$, ширина шлица $b_1 = 9$.

Тогда расчетные размеры валика будут:

1) расчетный наружный диаметр $D_p = d_{a1} + \Delta_D = 49,991$, где Δ_D — верхнее предельное отклонение номинального наружного диаметра d_{a1} ;

2) расчетный внутренний диаметр $d_p = d_{f1\min} + 0,25\delta_d = 44,755$, где δ_d — допуск на внутренний диаметр d_{f1} ; $d_{f1\min}$ — минимальный внутренний диаметр;

3) расчетная ширина шлица $b_p = b_{1 \min} + 0,25\delta_b = 8,971$, где δ_b - допуск на ширину шлица; $b_{1 \min}$ - минимальная ширина.

Расчет выполняется в следующей последовательности.

1. Угол подъема винтовой линии по условному среднему цилиндру принимаем $\lambda_{cp} = 2^\circ 30'$ (не более). Направление винтовой линии - правое.

2. Наружный диаметр фрезы принимается равным

$$D_{a0} = \frac{0,5(D_p + d_p)}{z_1 \operatorname{tg} \lambda_{cp}} + 0,25(D_p - d_p) = 166,734.$$

Полученное значение округляется в большую сторону до величины, кратной 5, и уточняется по паспортным данным станка: $D_{a0} = 170$.

3. Число зубьев фрезы в торцовом сечении: со шлифованным профилем

$$z_0 = 2,1 \cdot \frac{D_{a0}}{(D_p - d_p) + 4};$$

с нешлифованным профилем

$$z_0 = 2,75 \cdot \frac{D_{a0}}{(D_p - d_p) + 6}.$$

В данном случае профиль принят шлифованным, $z_0 = 39$.

4. В осевом сечении боковые стороны зубьев улиточной фрезы имеют прямолинейный профиль и различные значения осевых шагов (рис.2.7).

Осевой шаг входной боковой стороны зубьев (левой стороны при правом направлении винтовой линии) определяется, как

$$P_{ол} = z_0 \Delta P_{ол},$$

где $\Delta P_{ол}$ - осевое смещение входной боковой стороны пред-

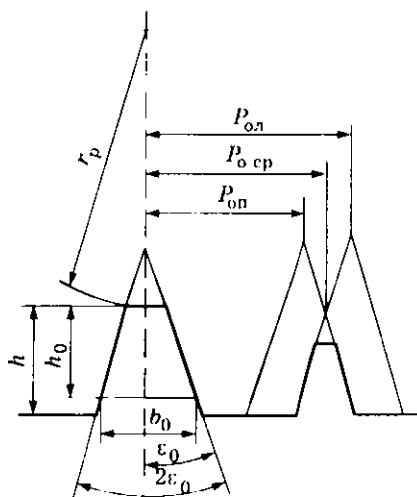


Рис.2.7. Размеры зубьев улиточной фрезы в осевом сечении

последнего зуба относительно последнего, равное

$$\Delta P_{ол} = 0,5D_p [\sin \theta + \{\cos(\theta - \delta) - \cos \theta\} \operatorname{tg} \theta - \sin(\theta - \alpha)];$$

$$\theta = \frac{180}{z_1} \beta; \sin \beta = \frac{b_p}{D_p}; \delta = \frac{360}{z_1 - z_0}.$$

В примере $\beta = 10,338^\circ$; $\theta = 12,162^\circ$; $\delta = 1,154^\circ$; $\Delta P_{\text{од}} = 0,515$; $P_{\text{од}} = 20,093$.

Осевой шаг выходной боковой стороны зубьев (правой стороны при правом направлении винтовой линии) определяется, как

$$P_{\text{он}} = z_0 \Delta P_{\text{он}},$$

где $\Delta P_{\text{он}}$ — осевое смещение выходной боковой стороны предпоследнего зуба относительно последнего, равное

$$\Delta P_{\text{он}} = \frac{0,5b - 0,5d_p \sin(\psi - \delta)}{\cos(\theta + \beta)}; \quad \sin \psi = \frac{b_p}{d_p}.$$

$\Delta P_{\text{он}} = 0,463$. Тогда $P_{\text{он}} = 18,042$.

В целях обеспечения удобства настройки станков при обработке боковых сторон зубьев фрезы расчетное значение $P_{\text{од}}$ округляется в большую сторону, а $P_{\text{он}}$ — в меньшую: $P_{\text{од}} \approx 20,1$; $P_{\text{он}} \approx 18,04$.

Средний осевой шаг

$$P_{\text{оср}} = (P_{\text{од}} + P_{\text{он}}) / 2 = 19,07.$$

Угол профиля боковых сторон зубьев в осевом сечении $\epsilon_0 = \theta + \beta = 22,5^\circ$.

Профиль вершины зубьев фрезы отличается в зависимости от их положения. Последний зуб имеет профиль вершины по дуге окружности (рис.2.8), радиус которой $r_p = 0,5d_p = 24,996$. Остальные зубья по вершине имеют прямолинейный профиль, параллельный оси фрезы, и располагаются в соответствии с принятой толщиной среза (см. ниже).

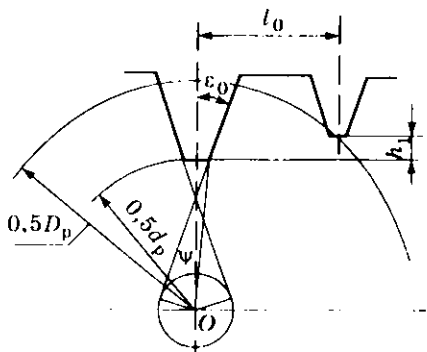


Рис.2.8. Схема определения перепада между вершинами последнего (чистового) и первого зубьев фрезы-улитки

Расчетная высота по последнему зубу

$$h_0 = 0,5[D_p \cos \theta]$$

$$d_p \cos(\epsilon_0 - \psi)] \approx 2,16.$$

Высота последнего зуба $h = h_0 + (0,5 \dots 2) \text{ мм} = 3,5$.

Расчетная толщина последнего зуба $b_0 = D_p \sin \theta = 10,532$.

5. Минимально необходимая длина рабочей части улиточной фрезы l_0 определяется в соответствии с расчетной схемой (рис.2.8), как расстояние вдоль оси фрезы между последним

(чистовым) зубом и первым режущим зубом фрезы, находящимся в контакте с наружной поверхностью нарезаемой детали, причем должно быть выдержано соотношение $l_0 = (1...2)P_{0, \text{ср}}$.

6. Подъем на зуб (толщина среза) по вершине улиточной фрезы $\Delta h = h_1/z_{0p}$, где z_{0p} — число режущих зубьев улиточной фрезы, равное

$$z_{0p} = \frac{l_0 + z_0}{P_{0, \text{ср}}}; \quad h_1 = 0,25D_p - l_0 - 0,5d_p \cos(\varepsilon_0 - \psi).$$

Данные зависимости применимы для глубоких плицев. В нашем случае для того, чтобы сразу несколько зубьев не имели по вершине профиль по дуге окружности, необходимо обеспечить перепад между последним и предпоследним зубьями

$$\Delta h_0 = 0,5d_p [1 - \cos(\varepsilon_0 - \psi)] = 0,406 \approx 0,41.$$

Полученное в данном случае значение Δh_0 является стрелой прогиба профиля. Толщина среза же будет значительно меньше, поскольку большая часть припуска будет уже удалена режущими зубьями.

Перепад высот между первым и предпоследним зубьями

$$\Delta h = h_0 - \Delta h_0 = 2,05.$$

Принимая, что для фасонных фрез рекомендуются подачи $S_z = 0,04...0,06$ мм/зуб, легко найти число режущих зубьев, как

$$z_p = \Delta h / S_z \approx 34.$$

Следовательно, зубья 36-39 необходимо удалить. Тогда минимально необходимая ширина фрезы

$$l_0 = b_0 + P_{0п} = \frac{z_0 - i}{z_0} = 26,72,$$

где i — количество зубьев, которое необходимо удалить.

Данное соотношение соответствует рекомендациям п.5.

7. Спад кулачка для затылования

$$K = \frac{\pi D_{a0}}{z_0} \cdot \operatorname{tg} \alpha_a,$$

где $\alpha_a = 10...12^\circ$ — задний угол по вершинам зубьев.

Для фрез с двойным затылованием $K_1 = (1,2...1,5)K$. Окончательно K и K_1 округляются до ближайших больших значений по стандартному ряду кулачков. В нашем случае $K = 2,5$; $K_1 = 4,0$.

8. Глубина стружечных канавок фрез с нешлифованной задней поверхностью

$$H = h + K + r + (0,5...1);$$

с шлифованной задней поверхностью

$$H = h + (K + K_1)/2 + r + (0,5...1) \approx 10,$$

где $r = 1...4$ — радиус дна стружечной канавки, мм.

9. Угол стружечной канавки принимается из конструктивных и технологических соображений, как и для червячных молульных фрез: 22, 25 или 30°. У нас он равен 25°.

10. Для простоты изготовления и эксплуатации фрезы передняя поверхность ее зубьев располагается обычно в осевом сечении, т.е. стружечные канавки прямые.

11. Диаметр отверстия под оправку выбирается из соотношения

$$d_0 = 0,625 (D_{a0} - 2H) = 93,75.$$

Полученное значение уточняется по ГОСТ 9472—83 из ряда 16; 22; 27; 32; 40; 50 и 80 мм. Здесь же назначаются размеры шпоночного паза: $d_0 = 80$; $C_1 = 85,5$.

Окончательный диаметр отверстия должен удовлетворять условию

$$0,5D_{a0} - H - (C_1 - d_0)/2 = 29,2 > 0,3d_0 = 24,$$

где C_1 — размер отверстия по шпоночному пазу. В данном случае условие выполняется.

12. Диаметр буртика принимается равным

$$d_6 = D_{a0} - 2H = (3...5) = 146.$$

13. Длина рабочей части фрезы

$$L_0 = l_0 + b_0 + (5...10) = 42.$$

14. Общая длина фрезы

$$L = L_0 + 2l_1 = 50,$$

где $l_1 = 2...5$ — длина цилиндрической части буртика, мм.

15. Расчетный диаметр условного среднего цилиндра находится по формуле

$$D_{\text{ср.расч}} = D_{a0} + h_0 = 0,5K = 166,19.$$

16. Расчетный угол подъема винтовой линии по условному среднему цилиндру определяется из выражения

$$\operatorname{tg} \lambda_{\text{ср.расч}} = \frac{P_{\text{оср}}}{\pi D_{\text{ср.расч}}} = 0,036.$$

Для обеспечения положительного заднего угла на входных боковых сторонах зубьев должно выдерживаться соотношение

$$\operatorname{tg} \lambda_{\text{ср.расч}} < \operatorname{tg} \alpha_0 + \operatorname{tg} \alpha_{a0} \operatorname{tg} \varepsilon_0 = 0,08.$$

В данном случае условие выполняется.

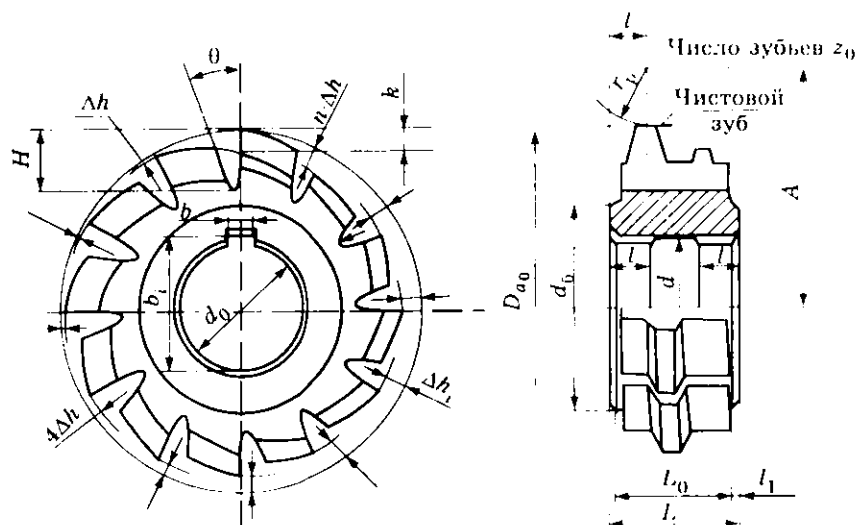


Рис.2.9. Конструктивные элементы фрезы-улитки

17. Конструктивное оформление фрезы-улитки показано на рис.2.9. Технические требования к данному типу фрез аналогичны требованиям к фрезам для обработки шлицевых валов (ГОСТ 8027 -87). Дополнительно на чертеже необходимо указать, какие зубья должны быть удалены.

2.4. ЧЕРВЯЧНЫЕ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ХРАПОВЫХ КОЛЕС

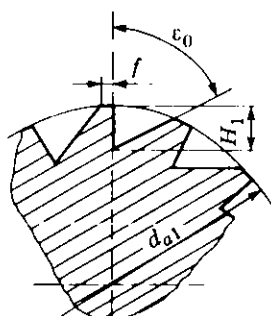


Рис.2.10. Параметры храпового колеса

Детали с зубьями прямолинейной несимметричной формы и остроконечными впадинами типа храповых колес находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Обработка таких деталей может быть выполнена как методом огибания (обкатки), так и методом копирования. Во втором случае используются специальные червячные фрезы определенной установки, последний зуб которых в ходе обработки оставляет «отпечаток», соответствующий окончательному профилю впадины колеса. Такие фрезы устанавливаются на шлице или зубофрезерных станках и работают аналогично обычным червячным фрезам.

Исходными данными для расчета служат параметры профиля колеса (рис.2.10): наружный диаметр d_{a1} , число зубьев z_1 , угол впадины зубьев ε_0 , высота зуба H_1 , ширина фаски на вершине зуба f .

Расчет выполняется в следующей последовательности.

1. Угол подъема винтовой линии по условному среднему цилиндру принимаем $\lambda_{cp} = 2^\circ 30'$ (не более). Направление винтовой линии — правое.

2. Наружный диаметр фрезы принимается равным

$$D_{a0} = \frac{(D_{a1} - H_1)}{z_1 \operatorname{tg} \lambda_{cp}} + H_1.$$

Полученное значение округляется в большую сторону до величины, кратной 5, и уточняется по паспортным данным станка.

3. Число зубьев фрезы в торцовом сечении

$$z_0 = 0,9 \frac{D_{a0}}{H_1} + 2$$

с округлением до ближайшего целого четного числа.

4. В осевом сечении боковые стороны зубьев имеют прямой линейный профиль и различные значения осевых шагов (рис.2.11). Их определение является основным вопросом при проектировании червячных фрез определенной установки.

Осевой шаг входной боковой стороны зубьев (левой стороны при правом направлении винтовой линии) определяется, как

$$P_{ол} \geq z_0 \Delta P_{ол},$$

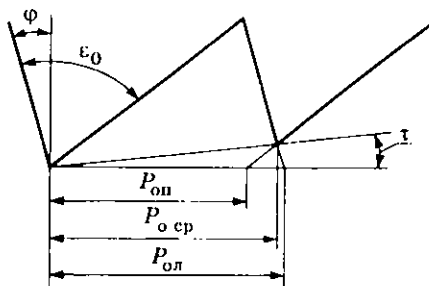


Рис.2.11. Размеры зубьев фрезы в осевом сечении

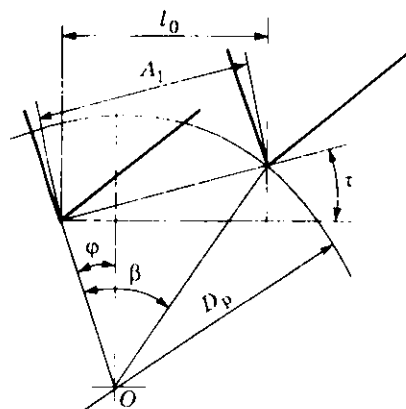


Рис.2.12. Схема определения минимально необходимой длины рабочей части фрезы для нарезания храповых колес

где $\Delta P_{\text{ол}}$ — осевое смещение входной боковой стороны предпоследнего зуба относительно последнего, равное

$$\Delta P_{\text{ол}} = r_{a0} \frac{\sin \delta}{\cos \varphi} ; \quad \delta = \frac{360^\circ}{z_1 - z_0},$$

где φ — угол профиля боковой входной стороны зубьев фрезы в осевом сечении (см. рис.2.12), равный $10...15^\circ$.

Осевой шаг выходной боковой стороны зубьев (правой стороны при правом направлении винтовой линии) определяется по формуле

$$P_{\text{оп}} > z_0 \Delta P_{\text{ол}},$$

где $\Delta P_{\text{оп}}$ — осевое смещение выходной боковой стороны предпоследнего зуба относительно последнего, равное

$$\Delta P_{\text{оп}} = A_0 \cdot \frac{\cos \varepsilon_0}{\cos(\varepsilon_0 - \varphi)} ; \quad A_0 = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 ;$$

$$A_1 = r_{a0} \sin \delta ; \quad A_2 = H_1 \frac{\sin \varepsilon_0}{\sin(\varepsilon_0 - \delta)} \cdot \operatorname{tg} \varepsilon_0 ;$$

$$A_3 = r_{a0} \sin \omega ; \quad A_4 = r_{a0} (\cos \delta - \cos \omega) \cdot \operatorname{tg} \varepsilon_0 ;$$

$$\omega = 360^\circ / z_1 - \arcsin(f / r_{a0}).$$

В целях обеспечения удобства настройки станков при обработке боковых сторон зубьев фрезы расчетное значение $P_{\text{ол}}$ округляется в большую сторону, а $P_{\text{оп}}$ — в меньшую.

Средний осевой шаг

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{оп}} + (P_{\text{ол}} - P_{\text{оп}}) \cdot \frac{\sin(\varepsilon_0 - \varphi) \cos \varphi}{\sin \varepsilon_0}.$$

Вершины зубьев червячной фрезы располагаются на поверхности конуса. Его угол (см. рис.2.12) равен

$$\operatorname{tg} \tau = \frac{P_{\text{оп}}}{P_{\text{ол}} - P_{\text{оп}}} \cdot \frac{\sin \varepsilon_0}{\cos \varphi} + \frac{\sin(\varepsilon_0 - \varphi)}{\cos \varphi}.$$

Угол профиля зубьев фрезы в осевом сечении принимается равным углу профиля впадины ε_0 нарезаемой детали.

5. Минимально необходимая длина рабочей части фрезы l_0 определяется в соответствии с расчетной схемой (рис.2.13), как расстояние вдоль оси фрезы между вершиной последнего (чистового) зуба и первым зубом фрезы, находящимся в контакте с наружной поверхностью нарезаемой детали:

$$l_0 = 0,5 D_{a1} \cdot \frac{\sin \beta \cdot \cos \tau}{\cos(\varphi - \tau)} ;$$

$$\beta = 90^\circ + \varphi - \tau - \arcsin \left(1 - \frac{H_1}{0,5 D_{a1}} \right) \cdot \cos(\varphi - \tau).$$

Должно быть выдержано соотношение $l_0 = (1...2) P_{\text{ср}}$.

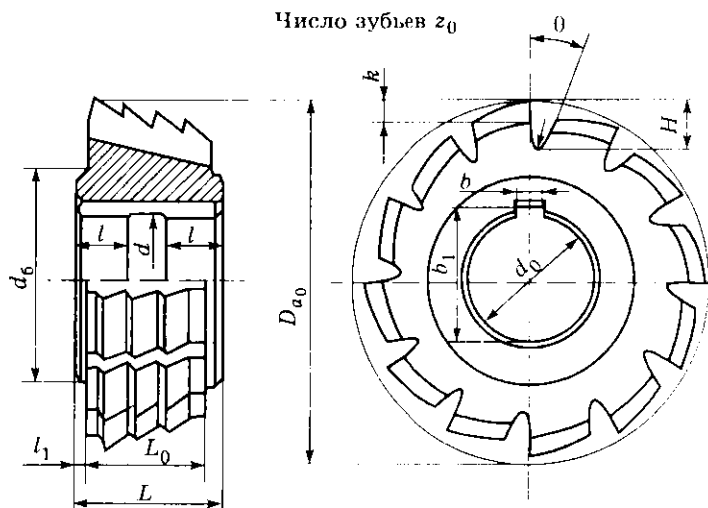


Рис.2.13. Конструктивные элементы фрезы для нарезания храповых колес

6. Спад кулачка для затылования

$$K = \frac{\pi D_{a0}}{z_0} \operatorname{tg} \alpha_a,$$

где $\alpha_a = 10 \dots 12^\circ$ — задний угол по вершинам зубьев.

Для фрез с двойным затылованием $K_1 = (1,2 \dots 1,5)K$. Окончательно K и K_1 округляются до ближайших больших значений по стандартному ряду кулачков.

7. Глубина стружечных канавок фрез с нешлифованной задней поверхностью

$$H = [H_1 + (0,5 \dots 2)] \cos \varphi + K + r + (0,5 \dots 1);$$

с шлифованной задней поверхностью

$$H = [H_1 + (0,5 \dots 2)] \cos \varphi + (K + K_1) \cdot 2 + r + (0,5 \dots 1),$$

где $r = 1 \dots 4$ — радиус дна стружечной канавки, мм.

8. Угол стружечной канавки принимается из конструктивных и технологических соображений, как и для червячных модульных фрез: 22, 25 или 30°.

9. Для простоты изготовления и эксплуатации фрезы передняя поверхность ее зубьев располагается обычно в осевом сечении, т.е. стружечные канавки прямые.

10. Диаметр отверстия под оправку выбирается из соображения

$$d_0 \leq 0,625 [D_{a0} - 2(H + l_0 \operatorname{tg} \tau)].$$

Окончательное его значение уточняется по ГОСТ 9472-83 из ряда 16; 22; 27; 32; 40 и 50 мм. Здесь же назначаются размеры шпоночного паза.

Окончательный диаметр отверстия должен удовлетворять условию

$$0,5D_{a0} + H + l_0 \operatorname{tg} \tau = (C_1 - d_0 - 2) + 0,3d_0,$$

где C_1 — размер отверстия по шпоночному пазу.

11. Диаметр буртика принимается равным

$$d_6 = D_{a0} + 2(H + l_0 \operatorname{tg} \tau) \quad (8...12).$$

12. Длина рабочей части фрезы

$$L_0 = l_0 + 0,5\omega + D_{a1} + (1...3),$$

причем ω принимается в радианах.

13. Общая длина фрезы

$$L = L_0 + 2l_1,$$

где $l_1 = 2...5$ — длина цилиндрической части буртика, мм.

14. Расчетный диаметр условного среднего цилиндра находится, как

$$D_{\text{ср.расч.}} = D_{a0} - H_1 \cos \varphi - 0,5K.$$

15. Расчетный угол подъема винтовой линии по условному среднему цилиндру определяется из выражения

$$\operatorname{tg} \lambda_{\text{ср.расч.}} = \frac{P_{\text{ср.}}}{\pi D_{\text{ср.расч.}}}$$

Для обеспечения положительного заднего угла на входных боковых сторонах зубьев должно выдерживаться соотношение

$$\operatorname{tg} \lambda_{\text{ср.расч.}} \leq \operatorname{tg} \alpha_0 - \operatorname{tg} \alpha_{a0} \operatorname{tg} \varphi.$$

16. Конструктивное оформление фрезы для нарезания храповых колес приведено на рис.2.14. Технические требования к данному типу фрез аналогичны требованиям к фрезам для обработки шлицевых валов (ГОСТ 8027-87). Дополнительно на чертеже необходимо указать, что зубья, расположенные за последним (чистовым), должны быть удалены.

Глава 3

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБКАТОЧНЫХ РЕЗЦОВ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Теория обработки деталей по методу обкатки неразрывно связана с теорией образования сопряженных поверхностей. Рассмотрим сущность образования этих поверхностей. Пусть две поверхности совершают заданные движения в пространстве. Эти две поверхности будут сопряженными, если в любой момент их движения они будут иметь соприкосновение либо в точке, либо по линии, причем в любой точке соприкосновения плоскость, касательная к одной из поверхностей, будет являться также касательной к другой поверхности.

Если сопряженные поверхности имеют соприкосновение в точке, то такие поверхности называются сопряженными поверхностями с точечным контактом. Если сопряженные поверхности имеют соприкосновение по линии, то такие поверхности называются сопряженными поверхностями с линейным контактом.

Пусть задано семейство поверхностей, зависящее от одного параметра φ , которое определяется уравнением $F(x, y, z, \varphi) = 0$. Меняя φ , получаем разные поверхности семейства. Возьмем две соседние поверхности семейства $F(x, y, z, \varphi) = 0$ и $F(x, y, z, \varphi + \Delta\varphi) = 0$. Предположим, что эти две соседние поверхности будут пересекаться. Тогда линия пересечения этих поверхностей изобразится следующей системой уравнений:

$$F(x, y, z, \varphi) = 0; \quad F(x, y, z, \varphi + \Delta\varphi) = 0.$$

Предельное положение указанной линии пересечения при $\Delta\varphi \rightarrow 0$ называется характеристикой поверхности. Уравнения характеристики будут следующими:

$$\begin{cases} F(x, y, z, \varphi) = 0, \\ \frac{dF(x, y, z, \varphi)}{d\varphi} = 0. \end{cases} \quad (3.1)$$

Меняя φ , получим некоторое геометрическое место характеристик, которое называется дискриминантной поверхностью.

Исключив параметр φ из системы уравнений (3.1), получим уравнение этой поверхности. Если дискриминантная поверхность касается поверхностей семейства, то она называется огибающей. Огибающая поверхность касается каждой поверхности семейства вдоль характеристик.

Пусть задана некоторая кинематическая пара с сопряженными поверхностями (например, пара цилиндрических зубчатых колес), при помощи которой осуществляется передача между осями, произвольно расположенными в пространстве.

Превратим один элемент кинематической пары в заготовку, на которой еще нет требуемых поверхностей. Тогда, чтобы получить их на заготовке резанием по методу обкатки, надо второй элемент пары превратить в инструмент с режущими кромками определенного профиля и дать заготовке и инструменту соответствующие движения.

Все виды режущего инструмента, работающего по методу обкатки, можно разделить на две группы:

1) инструмент с режущей поверхностью, например абразивный червяк или шлифовальный дисковый круг для шлифования зубьев цилиндрических колес;

2) инструмент с режущими кромками, например червячные фрезы, долбяки и др.

При проектировании режущих инструментов для нарезания зубчатых изделий с цилиндрическими и винтовыми поверхностями, относящихся ко второй группе, мы имеем дело с уже заданной поверхностью изделия, которая должна быть образована режущими кромками инструмента в их движении относительно заготовки.

Сопряженные поверхности кинематической пары, передающей вращение между двумя осями, один элемент которой превращен в заготовку изделия, а другой — в режущий инструмент, могут иметь как точечный, так и линейный контакт.

Режущая кромка указанного инструмента в момент профилирования изделия всегда должна иметь, как минимум, точечный контакт с его поверхностью. В противном случае, при отсутствии контакта между режущей кромкой и поверхностью изделия режущая кромка не сможет образовать заданный профиль изделия. Из сказанного следует, что если дать инструменту и изделию только движения, свойственные кинематической паре, которую они воспроизводят, например вращательные движения вокруг своих осей, т.е. движения обкатки, то на поверхности изделия режущая кромка инструмента оставит только след в виде линии контакта и не воспроизведет поверхность изделия. Поэтому для образования поверхности зубчатого изделия необходимо, помимо движений обкатки изделия и инструмента, сообщить дополнительное движение инструменту.

Если дать некоторое перемещение инструменту вдоль оси изделия, не меняя расстояния между осями, и одновременно обеспечить инструменту и изделию движения обкатки, то режу-

щая кромка оставит новый след на поверхности изделия в виде новой линии контакта, совершенно идентичной первоначальной, только смещенной по отношению к ней. Таким образом, на поверхности изделия образуется сеть из линий контакта, одна из которых представлена на рис.3.1.

В промежутках между линиями контакта будут заключены участки переходных поверхностей, не совпадающих с поверхностью изделия.

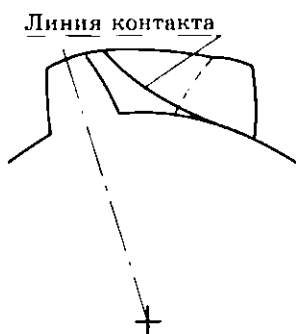


Рис.3.1. Линия
контакта инструмента
и изделия

Эти переходные поверхности будут характеризовать собой неровности, возникающие в процессе обработки, которые будут тем меньше, чем меньше будет скорость дополнительного движения по сравнению со скоростью движений обкатки.

Наиболее общим случаем обработки зубчатых изделий с цилиндрическими и винтовыми поверхностями резанием по методу обкатки является обработка изделий с перекрещивающимися осями. В этом случае воспроизводится пара цилиндрических зубчатых колес с винтовыми поверхностями.

Из этой пары можно получить все частные случаи передачи вращения между осями цилиндрическими зубчатыми колесами и все частные случаи нарезания их по методу обкатки. Рассмотрим эти случаи.

1-й случай. Пара цилиндрических зубчатых колес с винтовыми поверхностями и с перекрещивающимися осями. В этом случае возможны следующие способы обработки резанием по методу обкатки:

1) обработка цилиндрических зубчатых изделий с винтовыми зубьями обкатными резцами с винтовыми зубьями по методу зуботочения;

2) чистовая обработка шеверами с винтовыми зубьями цилиндрических зубчатых колес с винтовыми зубьями. Полагая в паре колес, работающей с перекрещивающимися осями, одно колесо прямозубым, получим несколько вариантов обработки зубчатых колес по методу обкатки.

3) обработку прямозубых цилиндрических колес обкатными резцами с винтовыми зубьями по методу зуботочения;

4) чистовую обработку тех же колес шеверами с винтовыми зубьями;

5) обработку косозубых цилиндрических колес обкатными резцами с прямыми зубьями по методу зуботочения;

б) чистовую обработку тех же колес шеврами с прямыми зубьями.

2-й случай. Полагая угол перекрепления между осями пары цилиндрических колес равным нулю, получим кинематическую пару, состоящую из двух цилиндрических колес с параллельными осями. При этом возможны следующие способы обработки резанием по методу обкатки:

1) зубодолбление прямозубых колес прямозубыми долбьяками;

2) зубодолбление косозубых колес косозубыми долбьяками.

3-й случай. Полагая угол перекрепления между осями пары цилиндрических колес равным 90° , получим кинематическую пару, состоящую из двух цилиндрических колес с перпендикулярными осями. Из этого случая вытекает метод обработки зубчатых колес с винтовыми поверхностями и червяков (в том числе и однозаходных, т.е. при числе зубьев нарезанного колеса $z = 1$) обкатными резцами при угле перекрепления между осями инструмента и заготовки, равным 90° , т.е. так называемый метод Корнелиуса (с точки зрения кинематики возможно также и шевингование червяков дисковым шевром).

4-й случай. Полагая, что число зубьев одного колеса пары небольшое (в том числе $z = 1$) и что это колесо имеет большой угол наклона зуба (такое колесо будет представлять собой червяк), тогда, превращая червяк в инструмент, получим метод зубофрезерования прямозубых и косозубых колес червячными фрезами. Очевидно, что с точки зрения кинематики возможно шевингование червячными шеврами не только червячных, но и цилиндрических колес.

5-й случай. Полагая число зубьев одного колеса пары бесконечно большим, получим кинематическую пару, состоящую из колеса и рейки. Тогда имеем следующие способы обработки изделий по методу обкатки:

1) обработка цилиндрических прямозубых и косозубых колес зуборезными гребенками, если превратить рейку в инструмент;

2) обработка реек долбьяками, если превратить колесо, зацепляющееся с рейкой, в инструмент;

3) обработка цилиндрических прямозубых и косозубых колес шеврами типа рейки;

4) обработка реек дисковыми шеврами.

Итак, если имеется кинематическая пара с точечным контактом сопряженных поверхностей зубьев, то:

1) на поверхности зубьев одного из элементов пары можно взять в качестве режущей кромки инструмента только одну ее единственную линию, представляющую собой линию контакта на этой поверхности;

2) для образования одной из этих сопряженных поверхностей линиями (режущими кромками инструмента) можно взять бесчисленное множество линий, не лежащих на другой сопряженной поверхности;

3) это бесчисленное множество линий должно лежать на поверхности, представляющей собой огибающую поверхности изделия при ее относительном движении относительно оси инструмента. На этой же поверхности должна лежать и контактная линия на сопряженной поверхности элемента кинематической пары, превращаемого в инструмент.

Таким образом, для определения уравнений режущих кромок инструмента, как для случая линейного контакта кинематической пары, так и для точечного, надо определять уравнения поверхности, представляющей собой огибающую поверхности изделия при ее движении относительно оси инструмента.

Для определения уравнений режущей кромки инструмента, работающего по методу обкатки, необходимо:

1) найти огибающую поверхности изделия в ее движении относительно оси инструмента;

2) выбрать на этой поверхности линию в качестве режущей кромки, исходя из конструктивных и технологических соображений при проектировании инструмента.

3.2. ОБЩЕЕ УРАВНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЯ

В общем случае за поверхность изделия принимаем винтовую поверхность. Обозначим через P шаг винтовой поверхности и через p — винтовой параметр этой поверхности:

$$p = P/2\pi.$$

Уравнение винтовой поверхности изделия запишем во вращающейся системе координат $x'y'z'$.

Если рассеять винтовую поверхность плоскостью, перпендикулярной к ее оси, то в сечении получим некоторую кривую, которая может быть записана в полярных координатах как

$$\Theta = f(\rho),$$

где Θ — полярный угол; ρ — полярный радиус-вектор.

Пусть кривая, заданная приведенным уравнением, занимает в начальный момент в системе координат $x'y'z'$ такое положение, при котором радиус-вектор некоторой точки ρ_0 составляет с осью

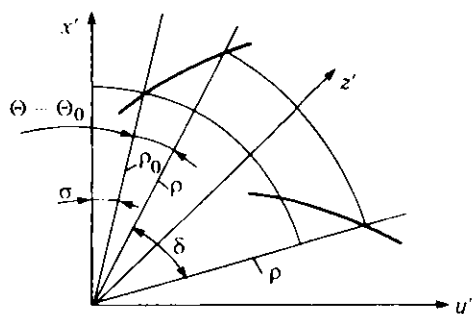


Рис.3.2. Схема сечения поверхности изделия плоскостью, перпендикулярной ее оси

x' некоторый угол σ , тогда угол между радиусом-вектором ρ_0 и произвольным радиусом-вектором будет равен $\Theta - \Theta_0$ (рис.3.2).

Сообщим кривой винтовое движение с параметром p . Эта кривая, очевидно, опишет винтовую поверхность.

Пусть кривая в своем винтовом движении повернется на некоторый угол δ , тогда она переместится вдоль оси z' на величину $p\delta$.

Следовательно, координаты любой точки винтовой поверхности, описываемой указанной кривой, будут следующими:

$$\begin{cases} x' = \rho \cos(\sigma + \Theta - \Theta_0 + \delta); \\ y' = \rho \sin(\sigma + \Theta - \Theta_0 + \delta); \\ z' = p\delta. \end{cases}$$

Обозначим $\sigma - \Theta_0 = \sigma_0$ - постоянный угол, тогда

$$\begin{cases} x' = \rho \cos(\sigma_0 + \Theta + \delta); \\ y' = \rho \sin(\sigma_0 + \Theta + \delta); \\ z' = p\delta. \end{cases}$$

Указанные уравнения являются уравнениями поверхности изделия в параметрическом виде, причем переменными параметрами являются ρ и δ .

3.3. ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Поверхность изделия находится в зацеплении с огибающей ее поверхностью, жестко связанной с вращающейся системой координат инструмента $X_n Y_n Z_n$. Указанные поверхности имеют контакт по характеристикам.

Если поверхность изделия будет участвовать в сложном движении относительно оси инструмента, можно получить семейство поверхностей, зависящее от угла поворота ϕ .

Найдя уравнения характеристик в системе координат изделия $X'Y'Z'$ и перейдя к неподвижной системе координат XYZ , можно получить общие уравнения поверхности зацепления в следующем виде:

$$\begin{cases} x = \rho \cos \psi; \\ y = \rho \sin \psi; \\ z = p\delta; \\ (zC \sin \omega + D \cos \omega - B\rho \cos \alpha_x)p - C\rho \cos \alpha_x(x - a), \end{cases}$$

где x , y и z — координаты поверхности зацепления; ρ — радиус-вектор профиля изделия в сечении, перпендикулярном к оси изделия;

$$\psi = \tau + \varphi + \sigma_0 + \Theta + \delta + \varphi; \quad \omega = \psi + \alpha_x;$$

α_x — угол между радиусом-вектором и касательной к профилю изделия в сечении, перпендикулярном к оси в рассматриваемой точке:

$$\operatorname{tg} \alpha_x = \rho(d\Theta/d\rho);$$

Θ — полярный угол профиля изделия в рассматриваемой точке, $\Theta = f(\rho)$; Θ_0 — полярный угол профиля изделия, соответствующий заданному радиусу-вектору ρ_0 , который составляет угол δ с осью X' ; φ — угол поворота изделия вокруг своей оси в процессе обкатки; δ — переменный угол; p — параметр винтовой поверхности изделия; $\sigma_0 = \sigma - \Theta_0$ — постоянный угол (см. рис.3.2); a — кратчайшее расстояние между осями инструмента и заготовки; $B = 1 + u \cos \vartheta$ — постоянная величина; $C = u \sin \vartheta$ — постоянная величина; $D = u \cos \vartheta$ — постоянная величина; ϑ — угол перекрещивания между осями колеса и инструмента; $u = z_1/z_0$ — передаточное число между колесом и инструментом; z_1 — число зубьев колеса; z_0 — число зубьев инструмента.

Уравнения (3.2) являются основными. Из этих уравнений можно определить уравнения поверхностей зацепления и уравнения режущих кромок для всех частных случаев обработки по методу обкатки.

Характер и форма поверхности зацепления для определенного профиля изделия зависят от следующих параметров:

- а) угла перекрещивания между осями инструмента и изделия ϑ ;
- б) параметра винтовой поверхности изделия p ;
- в) кратчайшего расстояния a между осями инструмента и изделия.

Вариант ($0 < \vartheta < 90^\circ$; $p = \rho$) является наиболее общим. Ему соответствует обработка косозубых колес наружного и внутреннего зацепления, а также червяков по методам зуботочения и шевингования. Этому же варианту соответствует обработка косозубых цилиндрических колес наружного зацепления по методу зубофрезерования. Поверхность зацепления представлена уравнениями (3.2).

Варианту ($0 < \vartheta < 90^\circ$; $p = \infty$) соответствует обработка прямозубых колес наружного и внутреннего зацепления по методу зуботочения и шевингования. Этому же варианту соответствует обработка прямозубых колес наружного зацепления по методу зубофрезерования.

Очевидно, что при $p = \infty$ уравнения (3.2) принимают вид

$$\begin{cases} x = \rho \cos \psi; \\ y = \rho \sin \psi; \\ \delta = 0; \\ zC \sin \omega + D \cos \omega - B\rho \cos \alpha_x = 0. \end{cases}$$

В этом случае $\delta = 0$, так как $p = \infty$.

Варианту ($\vartheta = 90^\circ$; $0 < p < \infty$) соответствует обработка косозубых колес, а уравнения (3.2) преобразуются к виду

$$\begin{cases} x = \rho \cos \psi; \\ y = \rho \sin \psi; \\ z = p\delta; \\ (zu \sin \omega - \rho \cos \alpha_x)p - u\rho \cos \alpha_x(x - a). \end{cases}$$

Если известны уравнения поверхности зацепления, то уравнения поверхности, огибающей поверхность изделия, могут быть найдены путем подстановки координат точек поверхности зацепления в уравнения, выражающие связь координат системы XYZ с координатами вращающейся системы координат инструмента $X_H Y_H Z_H$. Эта связь определена соответствующими уравнениями перехода.

Для варианта ($0 < \vartheta < 90^\circ$, $p = \rho$) уравнения огибающей поверхности будут иметь вид

$$\begin{cases} x_H = (\rho \cos \psi - a) \cos \varphi_H + (\rho \sin \psi \cos \vartheta - z \sin \vartheta) \sin \varphi_H; \\ y_H = (\rho \cos \psi - a) \sin \varphi_H + (\rho \sin \psi \cos \vartheta - z \sin \vartheta) \cos \varphi_H; \\ z_H = \rho \sin \psi \sin \vartheta + z \cos \vartheta; \\ z = \frac{\rho \cos \alpha_x (\rho \cos \psi - a)}{p \sin \omega} + \frac{B\rho \cos \alpha_x}{C \sin \omega} - a \operatorname{ctg} \vartheta \operatorname{ctg} \omega. \end{cases} \quad (3.3)$$

Для варианта ($0 < \vartheta < 90^\circ$, $p \neq r$) уравнения огибающей поверхности будут иметь вид

$$\begin{cases} x_H = (\rho \cos \psi - a) \cos \varphi_H + (\rho \sin \psi \cos \vartheta - z \sin \vartheta) \sin \varphi_H; \\ y_H = (\rho \cos \psi - a) \sin \varphi_H + (\rho \sin \psi \cos \vartheta - z \sin \vartheta) \cos \varphi_H; \\ z_H = \rho \sin \psi \sin \vartheta + z \cos \vartheta; \\ z = \frac{B \rho \cos \alpha_x}{C \sin \varphi} - a \operatorname{ctg} \vartheta \operatorname{ctg} \varphi. \end{cases} \quad (3.4)$$

Для варианта ($\vartheta = 90^\circ$; $0 < p < r$) уравнения огибающей принимают вид

$$\begin{cases} x_H = (\rho \cos \psi - a) \cos \varphi_H + z \sin \varphi_H; \\ y_H = (\rho \cos \psi - a) \sin \varphi_H + z \cos \varphi_H; \\ z_H = \rho \sin \psi; \\ z = \frac{\rho \cos \alpha_x (\rho \cos \psi - a)}{p \sin \varphi} + \frac{\rho \cos \alpha_x}{n \sin \varphi}. \end{cases} \quad (3.5)$$

3.4. УРАВНЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО МЕТОДУ ЗУБОТОЧЕНИЯ

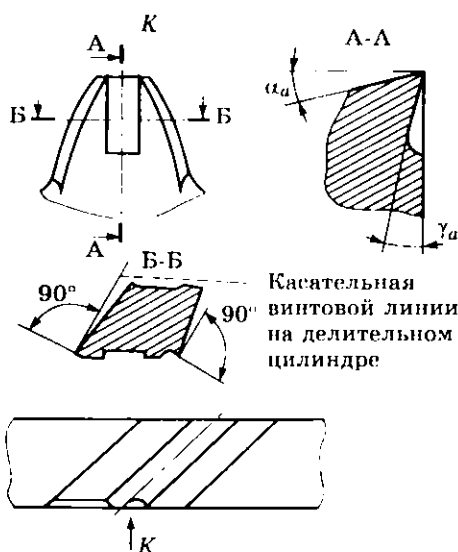


Рис.3.3. Схема заточки обкаточного реза

В данном случае возможны два варианта:

1-й вариант режущая кромка инструмента лежит в плоскости, перпендикулярной к его оси. Для обеспечения этого условия огибающую нужно расечь плоскостью, перпендикулярной к оси инструмента.

Уравнение этой плоскости будет

$$z_H = 0. \quad (3.6)$$

В этом случае обкатной резец должен иметь заточку, аналогичную заточке долбиков, показанной на рис.3.3.

Уравнения огибающей поверхности для случая зуботочения представлены уравнениями (3.3), (3.4) и (3.5).

Рассмотрев с этими уравнениями уравнение (3.6), получим следующие уравнения режущих кромок:

а) для случая обработки косозубого колеса при угле перекрещивания $0 < \vartheta < 90^\circ$:

$$\begin{cases} x_{II} = (\rho \cos \psi - a) \cos \varphi_{II} + (\rho \sin \psi \cos \vartheta - z \sin \vartheta) \sin \varphi_{II}; \\ y_{II} = (\rho \cos \psi - a) \sin \varphi_{II} - (\rho \sin \psi \cos \vartheta - z \sin \vartheta) \cos \varphi_{II}; \\ \rho \sin \psi \sin \vartheta + z \cos \vartheta = 0; \\ z = \frac{\rho \cos \alpha_x (\rho \cos \psi - a)}{p \sin \omega} + \frac{B \rho \cos \alpha_x}{C \sin \omega} \operatorname{actg} \vartheta \operatorname{ctg} \omega. \end{cases} \quad (3.7)$$

б) для случая обработки прямозубого колеса при угле перекрещивания $0 < \vartheta < 90^\circ$:

$$\begin{cases} x_{II} = (\rho \cos \psi - a) \cos \varphi_{II} + (\rho \sin \psi \cos \vartheta - z \sin \vartheta) \sin \varphi_{II}; \\ y_{II} = (\rho \cos \psi - a) \sin \varphi_{II} - (\rho \sin \psi \cos \vartheta - z \sin \vartheta) \cos \varphi_{II}; \\ \rho \sin \psi \sin \vartheta + z \cos \vartheta = 0; \\ z = \frac{B \rho \cos \alpha_x}{C \sin \omega} \operatorname{actg} \vartheta \operatorname{ctg} \omega. \end{cases} \quad (3.8)$$

в) для случая обработки косозубого колеса при угле перекрещивания $\vartheta = 90^\circ$:

$$\begin{cases} x_{II} = (\rho - a) \cos \varphi_{II} + z \sin \varphi_{II}; \\ y_{II} = (\rho - a) \sin \varphi_{II} - z \cos \varphi_{II}; \\ \psi = 0; \\ z = \rho \operatorname{ctg} \alpha_x [(p - a) - p + 1 - u]. \end{cases} \quad (3.9)$$

2-й вариант режущая кромка инструмента лежит в плоскости, перпендикулярной к направлению зуба на начальном цилиндре.

Для обеспечения этого условия надо рассечь огибающую указанной плоскостью, уравнение которой будет

$$z_{II} = y_{II} \operatorname{tg} \beta_0. \quad (3.10)$$

В этом случае обкатной резец должен иметь заточку, аналогичную заточке долбяков (рис.3.4).

Подставляя в уравнение (3.10) значения z_{II} и y_{II} из уравнений (3.3), (3.4) и (3.5) и делая преобразования, получим:

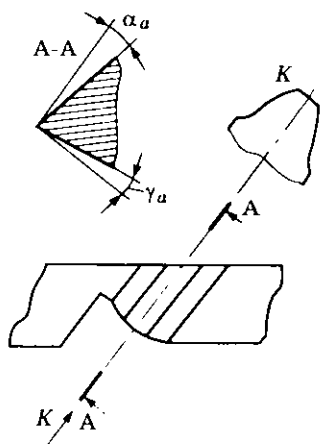


Рис.3.4. Схема заточки обкаточного резца

а) из уравнений (3.3) и (3.10) при $\theta = \vartheta = 90^\circ$, $0 = \rho = z$:

$$\begin{aligned} (x-a)\operatorname{tg}\beta_0 \sin \varphi_{II} + (\cos \vartheta \operatorname{tg}\beta_0 \cos \varphi_{II} - \sin \vartheta)y \\ (\sin \vartheta \operatorname{tg}\beta_0 \cos \varphi_{II} + \cos \vartheta)z = 0; \end{aligned} \quad (3.11)$$

б) из уравнений (3.4) и (3.10) при $0 = \rho = z$:

$$(x-a)\operatorname{tg}\vartheta \sin \varphi_{II} + (1 - \cos \varphi_{II})y \sin \vartheta - \cos \vartheta (1 + \operatorname{tg}^2 \vartheta \cos \varphi_{II})z = 0; \quad (3.12)$$

в) из уравнений (3.5) и (3.10) при $\vartheta = 90^\circ$; $\rho = z$:

$$(x-a)\operatorname{tg}\beta_0 \sin \varphi_{II} - y + z \operatorname{tg}\beta_0 \cos \varphi_{II} = 0. \quad (3.13)$$

Приписав к уравнениям (3.3), (3.4 и (3.5) уравнение (3.10), получим следующие уравнения режущих кромок:

а) для случая обработки косозубого колеса при угле перекрещивания $0 = \vartheta = 90^\circ$:

$$\begin{cases} x_{II} = (\rho \cos \psi - a) \cos \varphi_{II} + (\rho \sin \psi \cos \vartheta - z \sin \vartheta) \sin \varphi_{II}; \\ y_{II} = (\rho \cos \psi - a) \sin \varphi_{II} - (\rho \sin \psi \cos \vartheta - z \sin \vartheta) \cos \varphi_{II}; \\ z_{II} = \rho \sin \psi \sin \vartheta + z \cos \vartheta; \\ z_{II} = y_{II} \operatorname{tg}\beta_0; \\ z = \frac{\rho \cos \alpha_x (\rho \cos \psi - a)}{p \sin \omega} + \frac{B \rho \cos \alpha_x}{C \sin \omega} - a \operatorname{tg}\vartheta \operatorname{tg}\omega; \end{cases} \quad (3.14)$$

б) для случая обработки прямозубого колеса при угле перекрещивания $0 = \vartheta = 90^\circ$:

$$\begin{cases} x_{II} = (\rho \cos \psi - a) \cos \varphi_{II} + (\rho \sin \psi \cos \vartheta - z \sin \vartheta) \sin \varphi_{II}; \\ y_{II} = (\rho \cos \psi - a) \sin \varphi_{II} - (\rho \sin \psi \cos \vartheta - z \sin \vartheta) \cos \varphi_{II}; \\ z_{II} = \rho \sin \psi \sin \vartheta + z \cos \vartheta; \\ z_{II} = y_{II} \operatorname{tg}\beta_0; \\ z = \frac{B \rho \cos \alpha_x}{C \sin \omega} - a \operatorname{tg}\vartheta \operatorname{tg}\omega; \end{cases} \quad (3.15)$$

в) для случая обработки косозубого колеса при угле перекрещивания $\vartheta = 90^\circ$:

$$\begin{cases} x_{II} = (\rho \cos \psi - a) \cos \varphi_{II} + z \sin \varphi_{II}; \\ y_{II} = (\rho \cos \psi - a) \sin \varphi_{II} - z \cos \varphi_{II}; \\ z_{II} = \rho \sin \psi; \\ z_{II} = y_{II} \operatorname{tg}\beta_0; \\ z = \frac{\rho \cos \alpha_x (\rho \cos \psi - a)}{p \sin \omega} + \frac{\rho \cos \alpha_x}{u \sin \omega}. \end{cases} \quad (3.16)$$

В приведенных выше уравнениях $\phi_n = \omega\phi$, причем знак «+» берется для наружного зацепления и знак «-» для внутреннего.

На основании приведенных выше общих зависимостей можно определить уравнения режущей кромки инструмента для обработки наиболее часто используемых на производстве профилей:

1) для эвольвентного зацепления в общем случае

$$z = \operatorname{cosec} \omega (a_1 + a_2 \cos \omega + a_3 \rho \cos \psi); \quad (3.17)$$

$$a_1 = a \cos \alpha_x [(Br - Ca) \operatorname{tg} \beta_1];$$

$$a_2 = a \operatorname{ctg} \vartheta; \quad a_3 = \operatorname{tg} \beta_1 \cos \alpha_x; \quad (3.18)$$

при $\beta_1 = 0$ (прямозубое колесо)

$$z = a \operatorname{cosec} \omega \operatorname{ctg} \vartheta [(Br - Ca) \operatorname{tg} \vartheta \cos \alpha_x + \cos \omega]; \quad (3.19)$$

при $\vartheta = 90^\circ$

$$z = \operatorname{cosec} \omega [(\rho \cos \psi - a) \operatorname{tg} \beta_1 \cos \alpha_x + r_{b1} / u], \quad (3.20)$$

где α_x — торцовый угол зацепления; r_{b1} — радиус основной окружности детали;

2) для обработки изделий с прямолинейным профилем в сечении, перпендикулярном к оси (шлицевые валы и т.п.) в общем случае:

$$z = \operatorname{cosec} \omega \left\{ \frac{e}{\rho} \operatorname{ctg} \alpha_x (\rho \cos \psi - a) + \right. \\ \left. + a \operatorname{ctg} \vartheta \left[\frac{e(1 + u \cos \vartheta)}{ua \cos \vartheta} \operatorname{ctg} \alpha_x + \cos \omega \right] \right\}. \quad (3.21)$$

При $\rho = r$ (прямозубое изделие)

$$z = a \operatorname{cosec} \omega \operatorname{ctg} \vartheta \left[\frac{e(1 + u \cos \vartheta)}{ua \cos \vartheta} \operatorname{ctg} \alpha_x + \cos \omega \right]. \quad (3.22)$$

При $\vartheta = 90^\circ$ (обработка по методу Корнелиуса)

$$z = \operatorname{cosec} \omega \operatorname{ctg} \alpha_x [n_2 (\rho \cos \psi - a) + n_1], \quad (3.23)$$

где e — расстояние точки прямой от центра вала; $n_1 = e/u$; $n_2 = e/\rho$.

3.5. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

Пример 1. Расчет профиля обкаточного резца для нарезания косозубого колеса.

Исходные данные. Обрабатываемое изделие — зубчатое колесо эвольвентного профиля. Направление зуба правое, угол на-

клона зуба на делительной окружности $\beta_1 = 39^\circ 31'$; модуль нормальный $m_n = 2,54$ мм (pitch 10), число зубьев $z_1 = 27$, коэффициент коррекции 0. Угол зацепления в нормальном сечении $\alpha = 14^\circ 30'$; радиус окружности впадин $r_{f1} = 41,36$ мм; радиус окружности выступов $r_{a1} = 47$ мм.

Выбор исходных параметров инструмента. При выборе направления зуба инструмента и величины угла его наклона к оси инструмента надо стремиться к осуществлению угла перекрещивания между осями изделия и заготовки в пределах $60-90^\circ$. Поэтому направление зуба инструмента надо выбирать одноименным с направлением зуба нарезаемого колеса, так как в этом случае угол перекрещивания $\vartheta = \beta_1 + \beta_0$. В рассматриваемом случае выбираем номинальный угол наклона зуба инструмента $\beta_0 = 45^\circ$.

При выборе числа зубьев инструмента надо стремиться к максимально допустимой величине исходя из размеров посадочного места на станке. Выбираем для нашего случая $z_0 = 29$.

Для определения расстояния между осями инструмента и изделия принимаем для инструмента коэффициент коррекции 0.

Выбираем тип заточки, аналогичный приведенному на рис.3.4. Задний угол при вершине $\alpha_n = 20^\circ$.

Расчет постоянных величин.

1) суммарный коэффициент смещения $\varepsilon = z_1 + z_0 = 0$;

2) передаточное число $u = z_1/z_0 = 27/29 = 0,9310$;

3) межосевое расстояние

$$a = m_n \left[\frac{z_1}{2 \cos \beta_1} + \frac{z_0}{2 \cos \beta_0} \right] = 96,5348;$$

4) торцовый угол зацепления

$$\operatorname{tg} \alpha_s = \operatorname{tg} \alpha / \cos \beta_1 = 0,3352; \alpha_s = 18^\circ 32';$$

5) торцовый модуль

$$m_s = m_n / \cos \beta_1 = 3,29254;$$

6) радиус основной окружности колеса

$$r_{b1} = m_s z_1 \cos \alpha_s / 2 = 42,1442;$$

7) угол перекрещивания осей

$$\vartheta = \beta_1 + \beta_0 = 84^\circ 31';$$

8) постоянная

$$K = \frac{(1 + u \cos \vartheta) r_{b1}}{u a \cos \vartheta \cos \alpha_s} = 5,6362;$$

9) постоянный угол $\sigma_0 = \pi / 2z_1 - \operatorname{inv} \alpha_s = 0,0464$;

10) винтовой параметр колеса $p = r_{b1} \operatorname{tg} \beta_1 \cos \alpha_s$
53,8849;

11) наружный радиус инструмента в исходном сечении r_{a0}
 $- a - r_{f1} = 55,175$;

12) постоянная $a_1 = a \cos \alpha_s (K \operatorname{tg} \vartheta - \operatorname{tg} \beta_1) = 25,9753$;

13) постоянная $a_2 = a \operatorname{ctg} \vartheta = 9,2669$;

14) постоянная $a_3 = \operatorname{tg} \beta_1 \cos \alpha_s = 0,7820$.

Расчет координат точек профиля детали.

1) задаемся рядом значений углов давления α_x от минимума до максимума (табл.3.1): $\alpha_x = 3^\circ; 6^\circ; 7^\circ 30'; 9^\circ; 12^\circ; 15^\circ; 18^\circ 32'; 21^\circ; 24^\circ; 26^\circ 16' 28''$ (последний угол соответствует точке на вершине зуба колеса);

2) определяем соответствующие этим углам радиусы точек профиля изделия по формуле

$$p = r_{b1} \cos \alpha_x;$$

3) из уравнения (3.11)

$$(x - a) \operatorname{tg} \beta_0 \sin \varphi_u + (\cos \vartheta \operatorname{tg} \beta_0 \cos \varphi_u - \sin \vartheta) y \\ (\sin \vartheta \operatorname{tg} \beta_0 \cos \varphi_u + \cos \vartheta) z = 0,$$

используя тот или иной способ приближенного решения уравнений, определяем для данного значения α_x значение угла φ ;

В уравнении (3.11), как это видно из выше принятых обозначений и уравнения (3.17), имеем

$$x = p \cos \varphi; \quad y = p \sin \varphi;$$

$$z = \operatorname{cosec} \varpi (a_1 - a_2 \cos \varpi + a_3 p \cos \varphi);$$

$$\varpi = \varphi + \alpha_x; \quad \varphi_n = u\varphi; \quad \varphi = \varphi - \delta = \operatorname{inv} \alpha_x - \sigma_0; \quad \delta = z \cdot p.$$

При приближенном решении уравнения (3.11) достаточно получить $(F) = 0,001$. Результаты расчетов сведены в табл.3.1.

Таблица 3.1
Расчет координат точек профиля детали

№ точек	α_x	p	φ	x	y	z	φ
1	2	3	4	5	6	7	8
1	3°00'00"	42,2020	2°57'28"	42,1459	2,1639	21,5098	0,4043
2	6°00'00"	42,3763	2°44'22"	42,3291	2,0007	13,4244	0,2496
3	7°30'00"	42,5078	2°32'25"	42,4660	1,8840	10,8390	0,1986
4	9°00'00"	42,6695	2°24'20"	42,6319	1,7910	8,6970	0,1556
5	12°00'00"	43,0857	2°09'25"	43,0551	1,6216	5,2697	0,0859

1	2	3	4	5	6	7	8
6	15°00'00"	43,6308	1°57'50"	43,6052	1,4952	2,5278	0,0286
7	18°32'00"	44,4494	1°47'56"	44,4274	1,3953	0,2292	0,0310
8	21°00'00"	45,1425	1°43'00"	45,1223	1,3523	1,9797	0,0705
9	24°00'00"	46,1326	1°39'00"	46,1134	1,3283	4,0058	0,1183
10	26°16'08"	47,0000	1°37'05"	46,9813	1,3274	5,5066	0,1554

Расчет координат точек профиля резца.

1) зная при определенном по формуле (3.11) угле $\varphi_{\text{и}}$ значения x , y , z , $\varphi_{\text{и}}$, определяем по уравнению (3.14) координаты точек режущей кромки инструмента в системе $X_{\text{и}}Y_{\text{и}}Z_{\text{и}}$:

$$x_{\text{и}} = (x - a) \cos \varphi_{\text{и}} - (y \cos \vartheta - z \sin \vartheta) \sin \varphi_{\text{и}};$$

$$y_{\text{и}} = (x - a) \sin \varphi_{\text{и}} - (y \cos \vartheta - z \sin \vartheta) \cos \varphi_{\text{и}};$$

$$z_{\text{и}} = y \sin \vartheta + z \cos \vartheta;$$

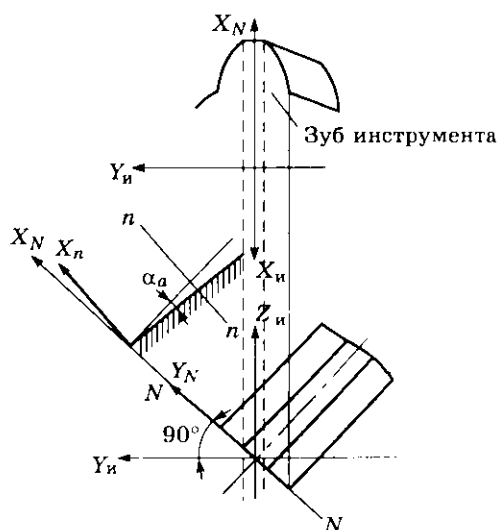


Рис.3.5. Схема к расчету координат точек профиля зуба обкаточного резца

задняя поверхность зуба инструмента. В табл.3.2, 3.3 приведены результаты расчета. На рис.3.6 даны элементы чертежа обкаточного резца.

2) определяем координаты точек профиля инструмента в нормальном сечении (рис.3.5, сечение XN) по формулам

$$x_N = x_{\text{и}}; y_N = y_{\text{и}} \cos \beta_0;$$

3) определяем координаты точек профиля зуба инструмента в сечении, перпендикулярном к направлению зуба с учетом заднего угла при вершине α_a (рис.3.5, сечение $n-n$) по формулам

$$x_n = x_N \cos \alpha_a; y_n = y_N.$$

Получаемый профиль также является профилем шаблона для шлифовального круга, при помощи которого будет обрабатываться задняя поверхность зуба инструмента.

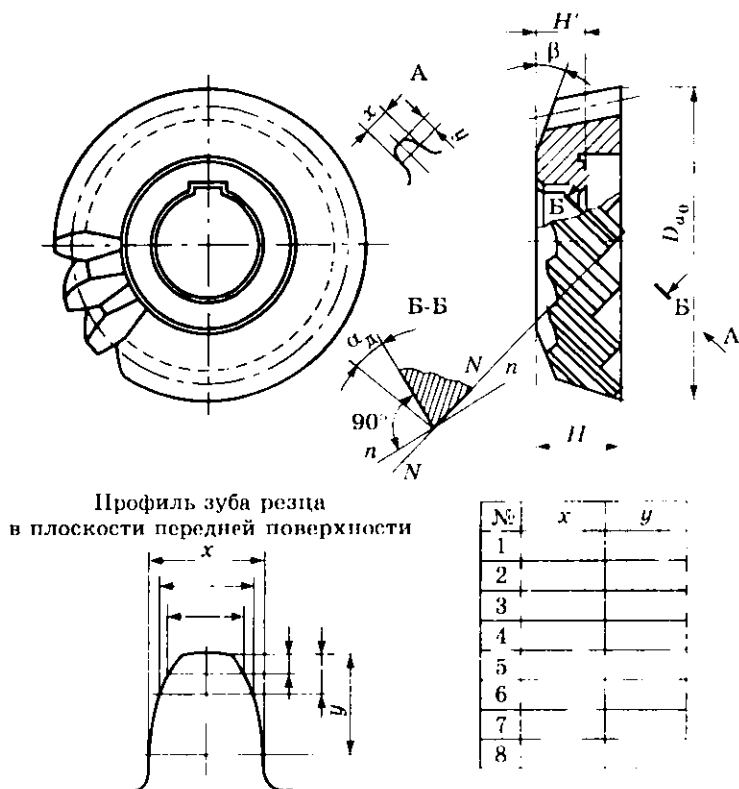


Рис.3.6. Конструктивные элементы обкаточного резца для обработки косозубого колеса

Таблица 3.2

Расчет координат точек профиля резца в нормальном сечении

№ точек	x_n	y_n	z_n	r_n	μ_n	Φ_n
1	58,5277	0,1122	0,2108	58,5277	0,1587	21° 34' 00"
2	55,8702	0,7087	0,7088	55,8702	1,0022	13° 18' 44"
3	55,1639	0,8416	0,8396	55,1639	1,1902	10° 35' 40"
4	54,6128	0,9520	0,9517	54,6128	1,3463	8° 18' 10"
5	53,7402	1,1105	1,1105	53,7402	1,5704	1° 34' 57"
6	52,9817	1,2475	1,2475	52,9817	1,7643	1° 31' 38"
7	52,0884	1,4100	1,4100	52,0884	1,9941	1° 39' 18"
8	51,4225	1,5357	1,5357	51,4225	2,1719	3° 45' 43"
9	50,5402	1,7046	1,7046	50,5402	2,4107	6° 18' 36"
10	49,8077	1,8481	1,8481	49,8077	2,6136	8° 19' 02"

**Координаты точек профиля резца в сечении,
перпендикулярном направлению зуба**

№ точки	x_n	y_n	r_n	№ точки	x_n	y_n	r_n
1	54,9980	0,1587	58,5278	6	49,7865	1,7643	52,9963
2	52,5008	1,0022	55,8747	7	48,9470	1,9941	52,1075
3	51,8371	1,1902	55,1703	8	48,3214	2,1719	51,4455
4	51,3192	1,3463	54,6711	9	47,4923	2,4107	50,5690
5	50,4993	1,5704	53,7517	10	46,8039	2,6136	49,8419

Пример 2. Расчет профиля обкатного резца для нарезания шлицевого вала $10 \times 46 \times 56 \times 7$.

Выбор исходных параметров инструмента.

Направление зуба инструмента правое. Выбираем угол наклона зуба инструмента $\beta_0 = 9^\circ \div 60^\circ$; число зубьев $z_0 = 16$; задний угол при вершине $\alpha_a = 20^\circ$, передний $\gamma_a = 10^\circ$. Тип заточки аналогичен приведенному на рис.3.3.

Расчет постоянных величин.

- 1) радиус начальной окружности шлицевого вала $r_{n1} = 28,0$ мм;
- 2) угол наклона витка вала по начальной окружности $\beta_1 = 0$;
- 3) шаг шлицев в торцовой плоскости вала на начальной окружности

$$P = \frac{\pi d_{w1}}{z_1} = \frac{3,14 \cdot 56}{10} = 17,5929 \text{ мм};$$

- 4) нормальный шаг вала на начальном цилиндре

$$P_n = P \cos \beta_1 = 17,5929 \text{ мм};$$

- 5) ширина впадины шлицевого вала

$$b_1 = P_n - b = 10,5929 \text{ мм},$$

где b — ширина шлица;

- 6) толщина зуба инструмента в нормальном сечении по дуге на начальном цилиндре

$$b_0 = b_1 = 10,5929 \text{ мм};$$

- 7) торцовый шаг зубьев инструмента на начальной окружности

$$P_0 = \frac{P_n}{\cos \beta_0} = \frac{17,5929}{\cos 60^\circ} = 35,1858 \text{ мм};$$

- 8) длина начальной окружности инструмента

$$L_{w0} = P_0 z_0 = 35,1858 \cdot 16 = 562,9734 \text{ мм};$$

9) радиус начальной окружности инструмента

$$r_{w0} = \frac{L_0}{2\pi} = \frac{562,9734}{2 \cdot 3,14} = 89,60 \text{ мм};$$

10) расстояние между осями инструмента и детали

$$a_w = r_{w1} + r_{w0} = 117,6 \text{ мм};$$

11) передаточное отношение

$$u = \frac{z_1}{z_0} = \frac{10}{16} = 0,625;$$

12) параметр винтовой поверхности детали $p = 3$;

13) постоянная $k_0 = 0,5b_1 \cdot \sin \beta_1 = 0$;

14) постоянный угол $\delta_0 = k_0 \cdot p = 0$;

15) постоянный угол

$$\lambda_1 = \frac{\pi}{z_1} - \delta_0 = \frac{3,14}{10} = 0,31416 = 17^\circ 54' 25'';$$

16) расстояние от прямой профиля до центра вала (рис.3.7)

$$e = 0,5b_1 \cdot \cos \beta_1 = 3,5 \text{ мм};$$

17) наружный радиус инструмента в исходном сечении

$$r_{a0} = a_w - r_{f1} = 117,6 - 23 = 94,6 \text{ мм};$$

18) постоянная $n_1 = e \cdot u = 3,5 \cdot 0,625 = 5,6$;

19) постоянная $n_2 = e \cdot p = 0$.

Расчет координат профиля детали.

1) задаемся на изделии рядом значений через 0,25 мм (результаты дальнейших расчетов сведены в табл.3.4);

2) определяем соответствующие этим радиусам углы

$$\sin \alpha_r = e \cdot p;$$

3) из уравнения (3.13)

$$(x - a_w) \operatorname{tg} \beta_0 \sin \varphi_n + y - z \operatorname{tg} \beta_0 \cos \varphi_n = 0,$$

используя метод Ньютона [4] для приближенного решения уравнений, определяем для данных значений a_w значения углов φ_n . В данном случае

$$x = \rho \cos \psi; y = \rho \sin \psi; z = \operatorname{cosec} \psi \operatorname{ctg} \alpha_r [n_2 (\rho \cos \psi - a_w) + n_1];$$

$$\omega = \psi + \alpha_r; \varphi = \psi - \tau; \tau = \lambda_1 - \alpha_r - \delta_0; \varphi_n = n \varphi.$$

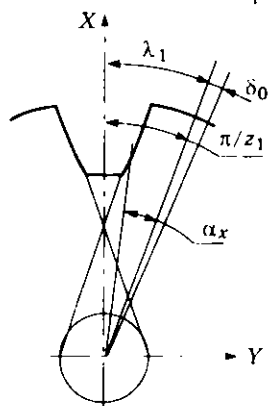


Рис.3.7. Схема к расчету постоянных профиля

Расчет координат точек профиля детали

№ точек	α_{γ}	ρ	ψ	x	y	z	ϕ
1	8,2717	24,3324	14,6503	23,5416	6,1530	-10,6531	4,9186
2	8,1312	24,7500	13,5212	24,0643	5,7856	10,0177	3,6491
3	8,0494	25,0000	12,8193	24,3771	5,5459	9,6021	2,8653
4	7,9692	25,2500	12,0941	24,6898	5,2893	9,1518	2,0599
5	7,8905	25,5000	11,3428	25,0021	5,0144	8,6828	1,2299
6	7,8134	25,7500	10,5626	25,3138	4,7193	8,1698	0,3727
7	7,7378	26,0000	9,7467	25,6249	4,4008	7,6176	0,5188
8	7,6637	26,2500	8,8882	25,9349	4,0551	-7,0210	1,4511
9	7,5910	26,5000	7,9803	26,2435	3,6784	6,3696	2,4321
10	7,5196	26,7500	7,0120	26,5500	3,2649	5,6515	3,4718
11	7,4496	27,0000	5,9640	26,8539	2,8048	4,8551	4,5898
12	7,3809	27,2500	4,8115	27,1540	2,2853	3,9555	5,8110
13	7,3134	27,5000	3,5108	27,4484	1,6837	2,9148	7,1792
14	7,2500	27,7393	2,0507	27,7215	0,9924	-1,7177	8,7027
15	6,5637	28,0000	0,0000	28,0000	0,0000	0,0000	11,4397

При приближенном решении уравнения достаточной для практики точностью будет 0,001.

4) определив значения угла ψ , находим координаты профиля детали x , y , z , а также ϕ_n .

Расчет координат профиля инструмента.

1) находим параметр $A_1 = x - a_n$;

2) определяем координаты точек режущей кромки инструмента в системе координат $X_n Y_n Z_n$:

$$x_n = A_1 \cos \phi_n + z \sin \phi_n;$$

$$y_n = A_1 \sin \phi_n - z \cos \phi_n;$$

$$z_n = y \operatorname{tg} \gamma_a.$$

3) определяем координаты точек профиля зуба инструмента в сечениях $N-N$, $n-n$ и в плоскости передней поверхности $M-M$ с учетом заднего угла при вершине (см. рис.3.5):

$$x_N = x_n; \quad y_N = y_n + \cos \beta_0;$$

$$x_n = x_N \cos \alpha_a; \quad y_n = y_N;$$

$$x_M = x_n \cos \gamma_a; \quad y_M = y_n.$$

4) находим радиус инструмента

$$r_n = \sqrt{x_M^2 + y_M^2}.$$

Результаты расчетов приведены в табл.3.5, 3.6.

Таблица 3.5

Расчет координат точек профиля резца в нормальном сечении

№ то- чек	x_n	y_n	z_n	x_N	y_N	φ_n
1	-94,5521	7,2430	3,1370	94,5521	3,6228	3,0741
2	-93,8913	7,8390	3,3951	93,8913	3,9208	2,2807
3	-93,4932	8,1714	3,5391	93,4932	4,0871	1,7908
4	-93,0937	8,4870	3,6758	93,0937	4,2450	1,2874
5	-92,6934	8,7842	3,8045	92,6934	4,3936	0,7687
6	-92,2931	9,0599	3,9239	92,2931	4,5315	0,2329
7	-91,8932	9,3175	4,0355	91,8932	4,6604	0,3243
8	-91,4946	9,5574	4,1394	91,4946	4,7803	0,9071
9	91,0987	9,7750	4,2337	91,0987	4,8892	1,5200
10	90,7070	9,9677	4,3171	90,7070	4,9855	2,1699
11	90,3212	10,1392	4,3914	90,3212	5,0713	2,8686
12	89,9445	10,2854	4,4547	89,9445	5,1444	3,6319
13	89,5816	10,4049	4,5065	89,5816	5,2042	4,4870
14	89,2554	10,4898	4,5433	89,2554	5,2467	5,4392
15	-88,8731	11,1462	4,8275	88,8731	5,5750	7,1498

Таблица 3.6

Координаты точек профиля резца в сечении,
перпендикулярном направлению зуба

№ точек	x_n	y_n	x_M	y_M	r_n
1	88,8520	3,6228	93,1162	3,6228	94,5695
2	88,2311	3,9208	92,4654	3,9208	93,9118
3	87,8570	4,0871	92,0734	4,0871	93,5156
4	87,4816	4,2450	91,6799	4,2450	93,1179
5	87,1054	4,3936	91,2857	4,3936	92,7194
6	86,7292	4,5315	90,8915	4,5315	92,3209
7	86,3535	4,6604	90,4977	4,6604	91,9228
8	85,9789	4,7803	90,1051	4,7803	91,5259
9	85,6068	4,8892	89,7152	4,8892	91,1315
10	85,2388	4,9855	89,3295	4,9855	90,7413
11	84,8762	5,0713	88,9496	5,0713	90,3569
12	84,5222	5,1444	88,5786	5,1444	89,9813
13	84,1811	5,2042	88,2211	5,2042	89,6194
14	83,8747	5,2467	87,8999	5,2467	89,2940
15	83,5154	5,5750	87,5235	5,5750	88,9169

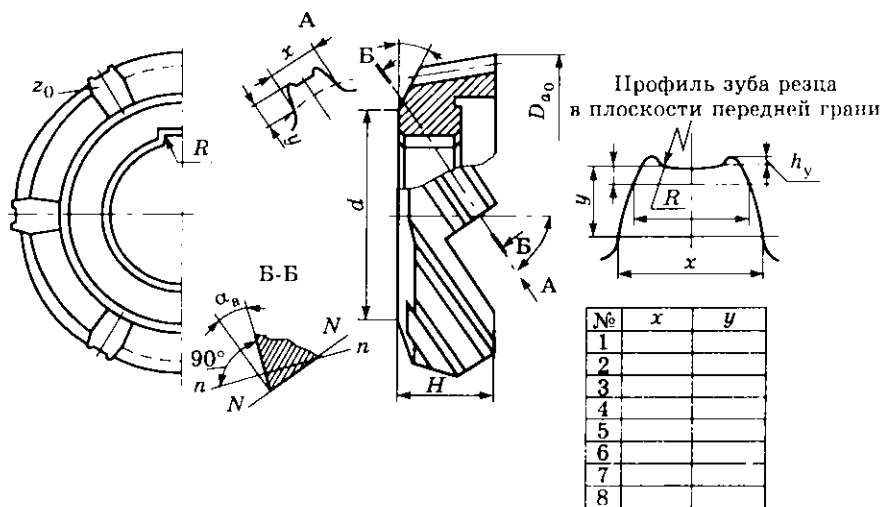


Рис.3.8. Конструктивные элементы обкаточного резца для обработки шлицевого вала

Полученный профиль также является профилем шаблона для шлифовального круга, при помощи которого будет обрабатываться задняя поверхность зуба инструмента.

Координаты x_M профиля инструмента заданы от его оси, что имеет некоторые неудобства для построения шаблона на профиль шлифовального круга. Целесообразно пересчитать их, приняв за нулевое значение координаты точки, соответствующей начальному радиусу резца. Координаты y_M левой и правой стороны зуба зеркальны.

На рис.3.8 приведены элементы рабочего чертежа обкатного резца, спроектированного на базе приведенного расчета.

Глава 4

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕЗВОЛЬВЕНТНЫХ ПРОФИЛЕЙ МЕТОДОМ ОГИБАНИЯ (ОБКАТКИ)

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В машиностроении широкое распространение получили зубчатые детали, используемые в качестве элементов передач и соединений. К таким деталям можно отнести: звездочки к приводным роликовым и втулочным цепям по ГОСТ 591-69, звездочки для приводных зубчатых цепей с односторонним и двухсторонним зацеплением по ГОСТ 13576-81, звездочки для пластинчатых цепей по ГОСТ 592-81, шлицевые прямобоочные соединения по ГОСТ 1139-80, шлицевые треугольные соединения, шкивы зубчато-ременных передач по ОСТ 38.05114-76, многогранные валы, храповые колеса, обгонные муфты и др.

В единичном производстве обработка таких деталей осуществляется дисковыми фасонными и угловыми фрезами с применением делительных устройств. При увеличении программы их выпуска оказывается целесообразным рассмотрение вопроса о применении для обработки червячных фрез, работающих по методу обкатки. Известно, что обработка зубчатых деталей по методу обкатки с помощью червячных фрез позволяет повысить производительность труда за счет непрерывности процесса обработки, точность профиля и качество обработанной поверхности. Все сложности конструирования инструментов, работающих методом обкатки, заключаются в определении координат точек режущей кромки. Кроме того, не менее важным становится вопрос о проектировании затыловочного резца и шлифовального круга, являющихся инструментами второго порядка при изготовлении червячной фрезы.

Комплексное решение вопросов формообразования включает определение:

- 1) возможности обработки зубчатой детали по методу обкатки;
- 2) производящей поверхности инструмента по заданным параметрам зубчатой детали;
- 3) возможности обработки зубчатой детали без подрезания и образования переходных кривых, если производящая поверхность инструмента задана;

4) профиля зубчатой детали по заданной производящей поверхности инструмента;

5) параметров переходных кривых в случае их образования;

6) положения передних и задних поверхностей инструмента;

7) профилей резцов и шлифовальных кругов для затылования и заточки.

Эти вопросы одинаково решаются для любых по профилю зубчатых деталей с прямыми и винтовыми зубьями при любых значениях геометрических параметров режущей части инструмента (передних и задних углов, числа заходов, направления затылования).

С геометрической и кинематической точек зрения формообразование номинальной поверхности детали поверхностями резания возможно при выполнении трех условий обрабатываемости.

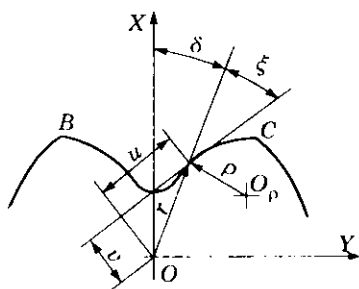


Рис. 4.1. Параметры профиля детали

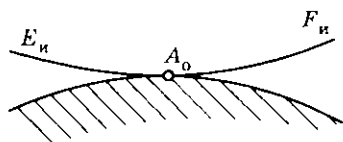


Рис. 4.2. К определению первого условия обрабатываемости

Первое условие обрабатываемости. В каждой точке A_0 контакта поверхности резания с номинальной поверхностью детали эти поверхности должны иметь общую касательную плоскость. При задании профиля детали параметрами r , δ , ξ (рис. 4.1) первое условие обработки зубчатой детали режущим инструментом можно сформулировать так: радиус r_{w1} начального цилиндра детали должен быть больше или равен величине u , подсчитанной для любой точки профиля детали (r , δ , ξ), т.е. $r_{w1} \geq u$.

Второе условие обрабатываемости. В зоне касания номинальной поверхности детали с поверхностью резания последняя не должна пересекать тело детали, т.е. в сечении каждой плоскостью Q , проходящей через данную точку A_0 касания номинальной поверхности с поверхностью резания, кривая $E_n F_n$

сечения поверхности резания не должна пересекать тело детали (рис. 4.2). Второе условие зубчатой детали режущим инструментом по-прежнему можно сформулировать так: принятое значение радиуса начального цилиндра детали r_{w1} должно находиться между корнями уравнения, подсчитанного для любой точки (r , δ , ξ) ее профиля:

$$r_{w1} = u^2 + [p - v \pm p(p - v)]^2,$$

где p – радиус кривизны детали в рассматриваемой точке; u , v – расстояние от рассматриваемой точки профиля детали до оси детали; $u = r \cos \xi$; $v = r \sin \xi$.

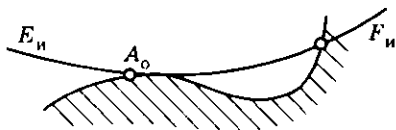


Рис.4.3. К определению второго условия обрабатываемости

Более подробно рекомендации по выбору r_{w1} будут рассмотрены ниже (см. разд.4.3).

Третье условие обрабатываемости. Поверхность резания не должна пересекать поверхность детали, т.е. в каждом сечении плоскостью Q , проходящей через

данную точку A_0 касания номинальной поверхности детали с поверхностью резания, кривая $Eи$ сечения поверхности резания не должна пересекать кривую EF сечения номинальной поверхности детали на всем протяжении последней (рис.4.3).

Если профиль зубчатой детали на некотором участке не удовлетворяет второму условию обрабатываемости, то теоретический профиль инструментальной рейки для этого участка будет иметь форму, которую практически нельзя осуществить на режущей части инструмента. Если же профиль зубчатой детали на некотором участке не удовлетворяет первому условию обрабатываемости, то теоретический профиль рейки для этого участка вообще отсутствует. В обоих случаях при окончательном оформлении рабочего профиля рейки, который будет положен в основу проектирования режущей части инструмента, на нем будут участки, которые не смогут сопрягаться с заданным профилем детали, в результате чего последний исказится переходными кривыми и подрезаниями.

4.2. ПАРАМЕТРЫ НОМИНАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

На практике профиль поверхности детали по своей форме и исходному положению может быть задан самыми различными линейными и угловыми параметрами в зависимости от конкретных условий конструирования, изготовления и эксплуатации детали.

Если в правой системе координат детали XYZ совместить ось Z с осью обрабатываемой поверхности детали, то для решения вопросов формообразования в каждой расчетной точке ее профиля

BC (см. рис.4.1) должны быть известны следующие параметры: полярные координаты r_i и δ_i ; угол ξ_i между касательной к профилю и направлением радиус-вектора OA или, как принято называть, угол давления; радиус ρ_i кривизны профиля.

Условимся считать знаки положительными у δ , если радиус OA повернут относительно оси X по часовой стрелке, у ξ , если касательная повернута относительно радиуса OA по часовой стрелке, у ρ , если линия OO_i повернута относительно радиуса OA по часовой стрелке.

Как правило, на чертежах задаются координаты узловых точек или отрезков сложного профиля, которых в большинстве случаев не достаточно для подробного описания профиля в координатах r, δ, ξ . Поэтому в каждом конкретном случае необходимо путем простейших математических расчетов рассчитывать пара-

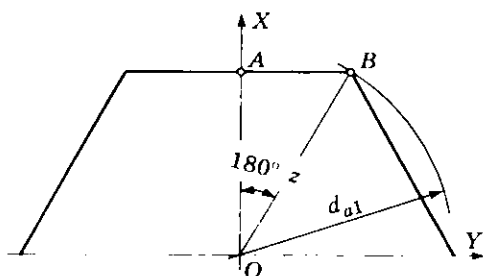


Рис.4.4. Профиль многогранного вала

(диаметр описанной окружности) вала; z_1 — число зубьев (граней).

метры r, δ, ξ как для узловых, так и для промежуточных точек. Рассмотрим это применительно к описанию достаточно распространенных профилей.

Пример 1. Расчет параметров профиля многогранных валов (рис.4.4). Исходными данными являются: d_{a1} — наружный диаметр

1.1. Координаты точки A:

$$x_A = \frac{d_{a1}}{2} \cos\left(\frac{180^\circ}{z_1}\right); \quad y_A = 0.$$

1.2. Координаты точки B:

$$\begin{aligned} x_B &= \frac{d_{a1}}{2} \cos\left(\frac{180^\circ}{z_1}\right); \\ y_B &= \frac{d_{a1}}{2} \sin\left(\frac{180^\circ}{z_1}\right). \end{aligned}$$

1.3. Координаты промежуточных точек участка AB:

$$x_{AB} = \frac{d_{a1}}{2} \cos\left(\frac{180^\circ}{z_1}\right) \quad \text{const};$$

$$y_{AB} = \frac{d_{a1}}{2} \sin \alpha_i;$$

$$0 < \alpha_i \leq \frac{180^\circ}{z_1}.$$

1.4. Полярный угол i -й точки $\delta_i = \arctg(y_i, x_i)$, угол давления $\xi_i = 90^\circ - \delta_i$. На правой стороне профиля эти углы положительные, на левой — отрицательные. Радиус кривизны профиля равен бесконечности.

Пример 2. Расчет параметров профиля шкивов зубчато-ременных передач. Исходными данными являются: наружный диаметр шкива d_{a1} , ширина дна впадины S_{f1} , высота зуба шкива h_1 , угол впадины $\gamma_{ш}$ (рис.4.5), которые определяются по ГОСТ 38.05114-76.

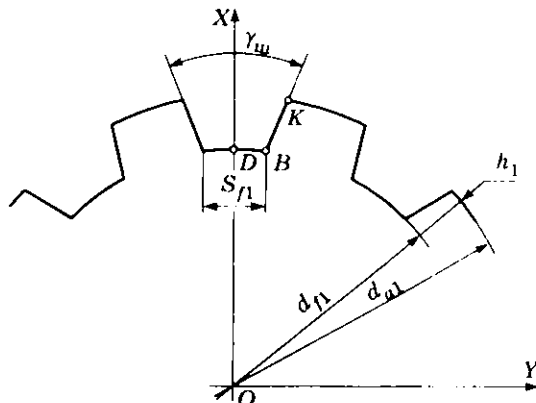


Рис.4.5. Профиль шкива зубчато-ременной передачи

2.1. Координаты точки B:

$$x_B = \left[\left(\frac{d_{a1}}{2} - h_1 \right)^2 - \left(\frac{S_{f1}}{2} \right)^2 \right]^{1/2};$$

$$y_B = \left[\left(\frac{d_{a1}}{2} - h_1 \right)^2 - x_B^2 \right]^{1/2}.$$

2.2. Координаты точки K являются координатами точки пересечения окружности радиуса d_{a1} с центром в точке O и прямой BK. Уравнение окружности $x^2 + y^2 = d_{a1}^2$. Уравнение прямой BK:

$$x - x_B = \operatorname{tg} \left(90^\circ - \frac{\gamma_{ш}}{2} \right) (y - y_B).$$

Получим уравнение:

$$y^2 \left[1 + \operatorname{tg}^2 \left(90^\circ - \frac{\gamma_{\text{ш}}}{2} \right) \right] - 2y \left[x_B \operatorname{tg} \left(90^\circ - \frac{\gamma_{\text{ш}}}{2} \right) - y_B \operatorname{tg}^2 \left(90^\circ - \frac{\gamma_{\text{ш}}}{2} \right) \right] + \left(\frac{d_{a1}}{2} \right)^2 - x_B^2 + 2x_B y_B \operatorname{tg} \left(90^\circ - \frac{\gamma_{\text{ш}}}{2} \right) - y_B^2 \operatorname{tg}^2 \left(90^\circ - \frac{\gamma_{\text{ш}}}{2} \right) = 0.$$

За точку K принимаем больший из его корней, т.е.

$$x_K = x_B + \operatorname{tg} \left(90^\circ - \frac{\gamma_{\text{ш}}}{2} \right) (y_K - y_B); \quad y_K = y_{\text{max}}.$$

2.3. Ординаты точек участка BK изменяются в пределах $y_B \leq y_{BK} \leq y_K$, а абсциссы точек этого участка определяем по формуле:

$$x_{BK} = x_B + \operatorname{tg} \left(90^\circ - \frac{\gamma_{\text{ш}}}{2} \right) (y_{BK} - y_B).$$

2.4. Координаты расчетных точек дна впадины (участок BD) можно найти, как

$$x_{BD} = \left(\frac{d_{a1}}{2} - h_1 \right) \cos \delta_{BD};$$

$$y_{BD} = \left(\frac{d_{a1}}{2} - h_1 \right) \sin \delta_{BD}.$$

2.5. Полярный угол i -й точки $\delta_i = \arctg(y_i/x_i)$. Углы давления $\xi_{DB} = 90^\circ$; $\xi_{BK} = \gamma_{\text{ш}}/2 + \delta_i$. На правой стороне профиля эти углы положительные, на левой — отрицательные. Радиус кривизны профиля на участке BK равен бесконечности, на участке BD : $\rho_{BD} = (d_{a1}/2) - h_1$.

Пример 3. Расчет параметров профиля треугольных шлицев (рис.4.6). Исходными данными являются: номинальный диаметр вала d_{a1} , диаметр впадин d_{f1} , число зубьев z_1 , угол впадины (90°), наружный диаметр по вершинам D_1 .

3.1. Определяем координаты точки C :

$$x_C = \frac{D_1}{2} \cos \frac{180^\circ}{z_1};$$

$$y_C = \frac{D_1}{2} \sin \frac{180^\circ}{z_1}.$$

3.2 Определяем координаты точки B , решая уравнение:

$$2y^2 + 2y(x_C - y_C) + x_C^2 - r_{a1}^2 - 2y_C x_C + y_C^2 = 0.$$

За ординату точки B принимаем больший из корней уравнения, т.е. $y_B = y_{\max}$; $x_B = x_C + y_B - y_C$.

3.3. Определяем координаты точки A , решая уравнение:

$$2y^2 = 2y(x_C - y_C) + x_C^2 - r_{f1}^2 - 2y_C x_C - y_C^2 = 0.$$

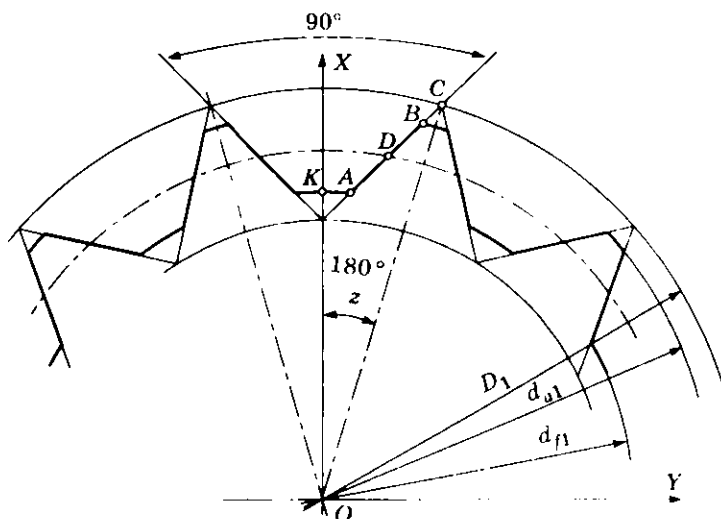


Рис.4.6. Профиль вала с треугольными шлицами

За ординату точки A принимаем больший из корней уравнения, т.е. $y_A = y_{\max}$; $x_A = x_C + y_A - y_C$.

3.4. Ординаты точек участка AB изменяются в интервале $y_A \leq y_{AB} < y_B$ и соответствующие им абсциссы можно найти по формуле $x_{AB} = y_C + y_{AB} - y_C$.

3.5. Определим координаты точки D , исходя из предположения, что она является пересечением начальной окружности радиуса $r_{w1} = (d_{a1} + d_{f1})/4$ и стороны AB профиля:

$$2y^2 + 2y(x_C - y_C) + x_C^2 + y_C^2 - 2x_C y_C - r_{w1}^2 = 0.$$

За абсциссу точки D принимаем больший из корней уравнения, т.е. $y_D = y_{\max}$; $x_D = x_C + y_D - y_C$.

3.6. Координаты расчетных точек дна впадины KA равны

$$x_{KA} = \frac{d_{f1}}{2} \cos \delta_{KA};$$

$$y_{BD} = \frac{d_{f1}}{2} \sin \delta_{KA}.$$

3.7 Полярный угол i -й точки $\delta_i = \arctg(y_i, x_i)$. Углы давления $\xi_{KA} = 90^\circ$, $\xi_{AB} = 45^\circ - \delta_i$. На правой стороне профиля эти углы положительные, на левой отрицательные. Радиус кривизны профиля на участке AB равен бесконечности, на участке KA $\rho_{KA} = d_{f1}/2$.

Пример 4. Расчет параметров профиля храпового колеса (рис.4.7). Исходными данными для расчета являются: число зубьев z_1 , наружный диаметр d_{a1} , высота профиля h_1 , угол выноса φ , угол наклона передней поверхности β .

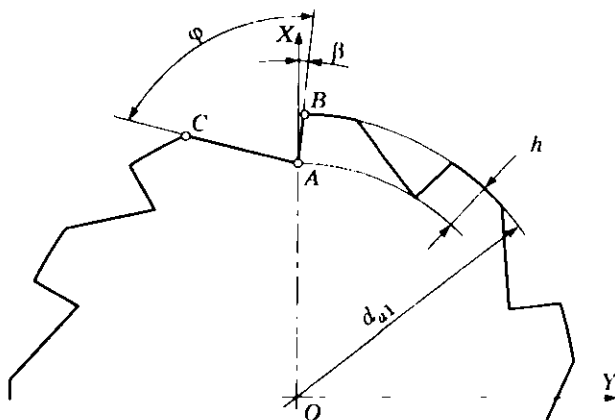


Рис.4.7. Профиль храпового колеса

4.1. Определяем координаты точки A : $x_A = d_{a1}/2 - h_1$, $y_A = 0$.

4.2. Определяем координаты точки B из уравнения

$$-y^2 \left[1 + \operatorname{tg}^2(90^\circ - \beta) \right] - 2yx_A \operatorname{tg}(90^\circ - \beta) + \left(\frac{d_{a1}}{2} \right)^2 - x_A^2 = 0.$$

За абсциссу точки B принимаем больший из корней уравнения, т.е. $x_B = x_A + \operatorname{tg}(90^\circ - \beta)y_B$; $y_B = y_{\max}$.

4.3. Определяем координаты точки C из уравнения

$$y^2 \left[1 + \operatorname{tg}^2(90^\circ + \varphi + \beta) \right] - 2yx_A \operatorname{tg}(90^\circ + \varphi + \beta) + \left(\frac{d_{a1}}{2} \right)^2 - x_A^2 = 0.$$

За абсциссу точки C принимаем меньший из корней уравнения, т.е. $x_C = x_A + \operatorname{tg}(90^\circ + \varphi + \beta)y_C$; $y_C = y_{\min}$.

б) диаметр делительной окружности: $d_1 = t/[\sin(180^\circ/z)]$; радиус $r_1 = d_1/2$;

в) геометрическая характеристика зацепления: $\lambda = t/d_n$;

г) коэффициент высоты зуба выбираем из условий:

если $1,4 \leq \lambda < 1,5$, то $K = 0,48$;

если $1,5 \leq \lambda < 1,6$, то $K = 0,532$;

если $1,6 \leq \lambda < 1,7$, то $K = 0,555$;

если $1,7 \leq \lambda < 1,8$, то $K = 0,575$;

если $1,8 \leq \lambda \leq 2$, то $K = 0,565$.

Если λ лежит вне пределов 1,4...2, то необходимо уточнить исходные данные, поскольку профиль звездочки рассчитан быть не может;

д) диаметр окружности выступов (рис. 4.9)

$$d_{a1} = t[K + \operatorname{ctg}(180^\circ/z)];$$

е) радиус впадины $r = 0,5025d_n + 0,05$;

ж) радиус сопряжения $r_c = 0,8d_n + r$;

з) угол сопряжения $\beta = (18-56^\circ)/z_1$;

и) половина угла впадины $\alpha = (55-60^\circ)z_1$;

к) половина угла охвата зуба $\varphi = 90^\circ - (180^\circ/z_1) - \alpha + \beta$;

л) радиус головки зуба

$$r_2 = d_n(1,24\cos\varphi + 0,8\cos\beta - 1,3025) - 0,05 \text{ мм};$$

м) длина прямого участка профиля FG

$$f = d_n(1,24\sin\varphi - 0,8\sin\beta);$$

н) для звездочек без смещения центров дуг впадин $e = 0$;

для звездочек со смещением $e = 0,03t$.

6.2. Координаты точки A : $x_A = r_1 - r$; $y_A = 0$.

6.3. Координаты точки B : $x_B = r_1 - r$; $y_B = e/2$. Координаты точки O_1 можно найти, решив уравнение

$$y^2 - 2yy_E + y_E^2 - \frac{r_c^2}{1 + \left(\frac{x_C - x_E}{y_C - y_E} \right)^2} = 0$$

и найдя меньший из его корней, т.е. $y_{O_1} = y_{\min}$. При этом необходимо учесть, что $x_C = r_1$; $y_C = e/2$; $x_E = r_1 - r\cos\alpha$; $y_E = e/2 + r\sin\alpha$. Тогда $x_{O_1} = x_E - \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha)(y_{O_1} - y_E)$.

Расстояния x_1 и y_1 равны:

$$x_1 = x_{O_1} - r_1; \quad y_1 = y_{O_1}.$$

Угол γ можно найти, как

$$\gamma = \operatorname{arctg} \left(\frac{x_1}{y_1 - e/2} \right).$$

6.4. Координаты точки F

$$y_F = y_{O_1} + r_c \cos(\gamma - \beta); \quad x_F = x_{O_1} - r_c \sin(\gamma - \beta).$$

6.5. Координаты точки G можно найти, решив уравнение

$$y^2 - 2yy_F + y_F^2 - \frac{f^2}{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)} = 0.$$

За ординату точки G принимаем больший из корней уравнения, т.е. $y_G = y_{\max}$.

Абсцисса точки G равна $x_G = x_F + (y_G - y_F) \operatorname{tg}(\alpha + \beta)$.

6.6. Координаты граничной точки K дугового выпуклого участка можно определить из квадратного уравнения

$$y^2 - y_2(r_1 - x_2)^2 + y_2 \left[r_{a1}^2 - (r_1 - x_2)^2 - r_2^2 + y_2^2 \right] - 4(r_1 - x_2)^2 + y_2^2 = 0,$$

$$4r_2^2(r_1 - x_2)^2 - 4y_2^2(r_1 - x_2)^2 - r_{a1}^2 - (r_1 - x_2)^2 - (r_2^2 + y_2^2)^2 = 0,$$

$$4(r_1 - x_2)^2 + 4y_2^2$$

За ординату точки K принимаем больший из корней уравнения, т.е. $y_K = y_{\min}$. Абсцисса точки K равна

$$x_K = r_{a1}^2 - y_K^2.$$

Расстояния $x_2 = r_1 - x_{O_2}$; $y_2 = y_{O_2}$, где x_{O_2} , y_{O_2} — координаты центра O_2 дугового выпуклого участка. Значение $y_{O_2} = y_{\max}$ найдем при решении квадратного уравнения

$$y^2 - 2yy_G + y_G^2 - \frac{r_2^2}{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)} = 0;$$

Тогда $x_{O_2} = x_G - \operatorname{ctg}(\alpha + \beta)(y_{O_2} - y_G)$.

6.7. Для точного профилирования червячной фрезы координат узловых точек недостаточно, и необходимо вводить дополнительные. Для вогнутого участка BE звездочки их можно найти, как

$$x_{BE} = r_1 - r \cos \alpha_{BE}; \quad y_{BE} = e/2 + r \sin \alpha_{BE}.$$

где α_{BE} — угол произвольной точки, лежащей на участке BE (см. рис.4.9). С достаточной точностью можно принять угловой шаг промежуточных точек $\Delta\alpha = \alpha/5$.

Координаты промежуточных точек вогнутого участка EF определяются, как

$$x_{EF} = x_{O_1} + r_c \sin(\gamma - \beta_{EF});$$

$$y_{BE} = y_{O_1} + r_c \cos(\gamma - \beta_{EF}),$$

где β_{EF} — угол сопряжения произвольной точки, лежащей на участке BE (см. рис.4.9). Обычно $\lambda\beta = \beta/3$.

Координаты промежуточных точек на участке FG можно получить из соотношений:

$$y_F \approx y_{FG} \leq y_G; x_{FG} = x_F + (y_{FG} - y_F) \operatorname{tg}(\alpha + \beta).$$

Координаты расчетных точек участка GK определяются, как

$$x_{GK} = r_1 - x_2 + r_2 \sin \lambda_{GK};$$

$$y_{GK} = y_2 + r_2 \cos \lambda_{GK}.$$

Пределы изменения угла λ_{GK} следующие:

$$\lambda_{\min} = \pi + \operatorname{arctg} \left[\frac{x_K - x_{O_2}}{y_K - y_{O_2}} \right];$$

$$\lambda_{\max} = \pi + \operatorname{arctg} \left[\frac{x_G - x_{O_2}}{y_G - y_{O_2}} \right].$$

Приращение угла $\Delta\lambda = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/4$.

6.8. Зная декартовы координаты точек поверхности детали, легко найти их полярные координаты:

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}; \quad \delta_i = \operatorname{arctg}(y_i/x_i).$$

Формулы для определения углов давления по участкам имеют вид:

$$\xi_{AB} = 90^\circ - \delta_{AB}; \quad \xi_{BE} = 90^\circ - \alpha - \delta_{BE};$$

$$\xi_{EF} = 90^\circ - \alpha - \beta - \delta_{EF}; \quad \xi_{FG} = 90^\circ - \alpha - \beta - \delta_{FG};$$

$$\xi_{GK} = 90^\circ - \operatorname{arctg} \frac{y_{GK}}{x_{GK}} - \operatorname{arctg} \left[\frac{y_{GK} - y_2}{r_2^2 - (y_{GK} - y_2)^2} \right].$$

Радиус кривизны профиля на этих участках принимает значения:

$$\rho_{AB} = r; \quad \rho_{BE} = r; \quad \rho_{EF} = r_c; \quad \rho_{FG} = r; \quad \rho_{GK} = r_2.$$

$$y_K \operatorname{tg}^2[90^\circ - (180^\circ/z_1)] + (v_{a1} - c_1)^2 - x_K^2 = 0, \\ + 2x_K y_K \operatorname{tg}[90^\circ - (180^\circ/z_1)] - y_K^2 \operatorname{tg}^2[90^\circ - (180^\circ/z_1)] = 0.$$

За ординату точки B принимаем больший из корней уравнения, т.е. $y_B = y_{\max}$. Абсцисса точки B равна

$$x_B = x_K + \operatorname{tg}[90^\circ - (180^\circ/z_1)](y_{AB} - y_K).$$

7.5. Ординаты расчетных точек участка AB изменяются в пределах $y_A \leq y_{AB} \leq y_B$, абсциссы определяются выражением

$$x_{AB} = x_K + \operatorname{tg}[90^\circ - (180^\circ/z_1)](y_{AB} - y_K).$$

Координаты расчетных точек дна впадины определяются по формулам

$$x_{DA} = (d_{f1}/2) \cos \delta_{DA};$$

$$y_{DA} = (d_{f1}/2) \sin \delta_{DA}.$$

7.6. Полярный угол точки A равен $\delta_A = \arctg(y_A/x_A)$. Угол давления на участке DA неизменен и равен $\angle_{DA} = 90^\circ$, на участке AB определяется, как $\xi_{AB} = 180^\circ - z_1 - \delta_{AB}$.

Радиусы кривизны профиля на участках DA и AB равны соответственно d_{f1} и r .

4.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА НАЧАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА ДЕТАЛИ

При обработке деталей червячной фрезой начальный цилиндр фрезы обкатывается по начальному цилиндру детали. Качение двух начальных цилиндров друг по другу можно рассматривать как качение одного из них по начальной плоскости при одновременном качении начальной плоскости по другому начальному цилиндру. Роль начальной плоскости выполняет репка, поэтому радиус начального цилиндра детали необходимо определить, исходя из условий формообразования поверхности детали режущим инструментом. Допустимые значения радиуса начального цилиндра детали определяются по формуле (см. п.4.1):

$$r_{w1} = \frac{1}{4} u^2 + \left[\rho - v + \sqrt{\rho(\rho - v)} \right]^2.$$

Это уравнение дает два корня $r_{w1\max}$ и $r_{w1\min}$, определяющих границы значений r_{w1} .

Если рассматриваемый участок прямолинейный, то

$$r_{w1} = \frac{1}{4} u^2 + \frac{v^2}{4}.$$

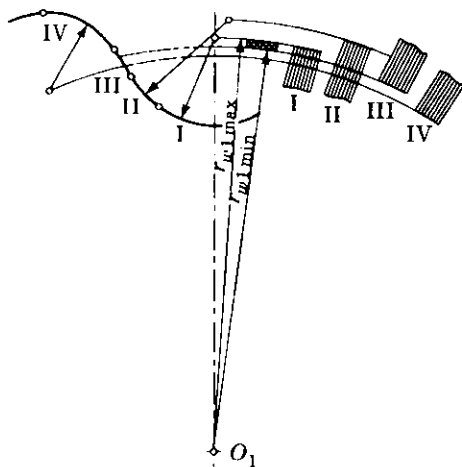


Рис.4.11. К определению радиуса начальной окружности

Решение данных уравнений дает возможность для каждой характерной точки на профиле детали найти r_{w1min} и r_{w1max} , как показано на рис.4.11. После этого назначают r_{w1} детали таким образом, чтобы его значение лежало между допустимыми значениями r_{w1} для всех точек.

На практике обычно используют приближенную методику выбора радиуса начальной окружности, согласно которой для прямолинейных контуров минимально допустимый радиус начального цилиндра равен

$$r_{w1} = 0,5 \cdot d_{a1}^2 / 0,75b_1^2,$$

где d_{a1} — наружный диаметр детали; b_1 — ширина зубчатого выступа на делительном диаметре.

Для более сложных контуров, например звездочки, r_{w1} d_1^2 .

4.4. ПАРАМЕТРЫ ИСХОДНОЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ РЕЙКИ, ИСХОДНОГО ЧЕРВЯКА И ПРОФИЛЯ ЗУБА ЧЕРВЯЧНОЙ ФРЕЗЫ

При проектировании режущих инструментов, работающих по методу обкатки, режущий контур определяется в ходе превращения исходного (основного) червяка в инструмент. Параметры червяка, в свою очередь, можно найти в результате рассмотрения зацепления детали с исходной инструментальной рейкой.

1. Из всех сечений зуба червячной фрезы только в одном расчетном сечении профиль зуба будет теоретически точным. Положение этого сечения определяется радиусом начального цилиндра основного червяка. Его можно найти, рассматривая профиль фрезы лежащим в плоскости ее передней поверхности либо примерно посередине слоя, стачиваемого в процессе эксплуатации фрезы. Соответствующие формулы имеют вид:

$$r_{wч} = 0,5(d_{a0} - 2h_{a1});$$

$$r_{wч} = 0,5[d_{a0} - 2h_{a1} - (0,2...0,5)K],$$

где d_{a0} — наружный диаметр червячной фрезы; h_{a1} — высота профиля детали до начальной окружности, равная $h_{a1} = r_{w1}$

$d_1/2 + r$; r — радиус впадины; $K = \pi d_{a0} \operatorname{tg} \alpha_a / z_0$ — величина первого затылования; $\alpha_a = 10-12^\circ$ — задний угол на вершине зуба фрезы; z_0 — число зубьев фрезы.

Второй случай более предпочтителен, поскольку снижает различия в обработанном профиле, возникающие в результате переточек фрезы.

Диаметр и число зубьев фрезы можно найти по табл. 13.22 в [9], если в качестве определяющего параметра использовать приведенный модуль

$$m_{пр} = (r_{a1} - r_{f1})/2,2.$$

2. Угол подъема винтовой линии на начальном цилиндре основного червяка найдем, как

$$\sin \lambda_{wч} = \frac{r_{w1} z_{\text{ч}} \cos \varepsilon_p}{r_{wч} z_1},$$

где $z_{\text{ч}}$ — число заходов червяка, для сложных профилей обычно принимается равным 1; ε_p — наклона винтовой линии на начальном цилиндре детали; поскольку сложные зубчатые профили, как правило, прямые $\varepsilon_p = 0$.

3. Винтовой параметр основного червяка $p_{\text{ч}} = r_{wч} \operatorname{ctg} \lambda_{wч}$.

4. Осевой шаг червяка и фрезы $P_o = 2\pi p_{\text{ч}}$.

5. Шаг фрезы по нормали к направлению витков $P_n = P_o \cos \lambda_{wч}$.

6. Параметры точек профиля инструментальной рейки находим в следующей последовательности:

$$u_i = r_i \cos \varepsilon_i; \quad \cos \tau_i = u_i / r_{w1};$$

$$\mu_i = \pm \tau_i - \xi_i; \quad \varphi_i = \mu_i - \delta_i;$$

$$x_{pi} = r_i \cos \mu_i - r_{w1};$$

$$z_{pi} = (r_i \sin \mu_i - r_{w1}) \sin \varepsilon_p;$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{pi} = \operatorname{tg} \tau_i \sin \varepsilon_p.$$

Здесь r_i , ξ_i и δ_i — радиус-вектор, полярный угол и угол давления i -й точки профиля; x_{pi} , z_{pi} — координаты i -й точки профиля рейки; α_{pi} — угол между следами плоскости, касательной к профилю в данной узловой точке, и плоскости, перпендикулярной к оси фрезы.

Знак $\pm$ в приведенном выше уравнении означает, что для правой стороны впадины профиля детали принимается знак «+», а для левой — «-».

7. Радиус кривизны в точках профиля инструментальной рейки:

$$\rho_{pi} = \frac{\cos^2 \tau_i}{\cos^3 \alpha_{pi} \sin \varepsilon_p} \left(v_i \cos \tau_i - 2u_i \sin \tau_i - \frac{r_{w1} u_i \sin^2 \tau_i}{\rho_i - v_i} \right).$$

8. Проверяем выполнение условия

$$\frac{1}{p_q^2} r_{wq}^3 - \frac{x_{pi}}{p_q^2} r_{wq}^2 + r_{wq} + \frac{x_{pi}}{\sin^2 \alpha_{pi}} \left(\frac{x_{pi}}{\rho_{pi} \sin \alpha_{pi}} - 1 \right) \geq 0.$$

9. Параметры профиля основного червяка можно найти, как

$$\operatorname{tg} \tau_{qi} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_{pi}}{\sin \lambda_{wq}}; \quad \operatorname{tg} \mu_{qi} = \frac{x_{pi}}{\operatorname{tg} \tau_{qi} (r_{wq} - x_{pi})};$$

$$\varphi_{qi} = \frac{\frac{x_{pi}}{r_{wq}} + \frac{z_{pi}}{\operatorname{tg} \lambda_{wq}}}{r_{wq}};$$

$$r_{qi} = \frac{r_{wq} - x_{pi}}{\cos \mu_{qi}};$$

$$\delta_{qi} = \mu_{qi} + \varphi_{qi}; \quad \xi_{qi} = \tau_{qi} - \mu_{qi}.$$

10. Координаты точек режущей кромки червячной фрезы в плоскости винтовой передней поверхности определяются по следующим формулам:

$$\sin \xi_{ki} = \frac{d_{a0} \sin \gamma_a}{2r_{qi}};$$

$$p_k = \frac{r_{wq}}{\operatorname{tg} \lambda_{wq}}; \quad p_q = \frac{r_{wq}}{\operatorname{ctg} \lambda_{wq}};$$

$$\delta_{ki} = \gamma_a - \varepsilon_{ki}; \quad \varphi_{qli} = \frac{\delta_{ki} - \delta_{qi}}{1 + \frac{p_q}{p_k}};$$

$$x_{qli} = r_{qi} \cos(\delta_{qi} + \varphi_{qli});$$

$$y_{qli} = r_{qi} \sin(\delta_{qi} + \varphi_{qli});$$

$$z_{qli} = p_q \varphi_i,$$

где γ_a — передний угол в вершинной точке зуба фрезы.

11. Координаты точек режущей кромки червячной фрезы в нормальной плоскости определяются по формулам:

$$x_{Opi} = x_{Oli}; \quad z_{Opi} = z_{Oli} \cos \lambda_{rc} + y_{Oli} \sin \lambda_{rc}.$$

4.5. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ФРЕЗ*

Наряду с наружным диаметром, числом зубьев, а также значениями заднего угла и первого затылования фрезы необходимо определить ряд ее конструктивных элементов.

1. Передний угол на вершинной режущей кромке γ_a для чистовых фрез принимается равным 0° . Для черновых фрез его можно принять в пределах $\gamma_a = 10 \dots 15^\circ$.

2. Величина второго затылования на вершине зуба определяется по формуле:

$$K_1 = (1,3 \dots 1,7)K$$

с последующим округлением до чисел, кратных 0,5.

3. Элементы стружечной канавки фрезы:

а) глубина канавки $H = h_0 + (K + K_1)/2 + r_3$, где $h_0 = r_{a1} r_{f1}$;

б) радиус закругления дна канавки принимается кратным 0,5 мм ($r_3 = 1,0; 1,5; 2,0 \dots 3,0$);

в) угол профиля канавки θ в зависимости от рекомендуемых в [9] одно- или двухугловых фрез принимается равным $22; 25$ или 30° (из конструктивных соображений);

г) толщина зуба у основания S должна соответствовать условию $S \geq (0,8 \dots 1,0)H$. Если $S < 0,8H$, зуб будет недостаточно прочным и величину S необходимо скорректировать;

д) при шлифовании зуба по профилю шлифованная часть зуба должна иметь длину не менее $1/3$ окружного шага или $2/3$ длины зуба по дуге наружного диаметра фрезы. Если длина шлифованной части зуба будет меньше указанной, то значительно уменьшается срок службы фрезы. При выборе этой величины необходимо подобрать ориентировочно размеры шлифовального круга и проверить чтобы при затыловании он не врезался в соседний зуб.

Диаметр шлифовального круга определяется по формуле:

$$D_k \leq \frac{0,5d_{a0} \sin(180^\circ - z_0)}{\sin \alpha_a},$$

где d_{a0} — наружный диаметр фрезы; $(180^\circ/z_0)$ — угол контакта шлифовального круга с затылуемым зубом фрезы.

* Рассматриваются цельные червячные фрезы. Для проектирования сборных конструкций можно воспользоваться рекомендациями [9, 10].

Определение длины шлифованной части зуба и диаметра круга рекомендуется дополнительно выполнить графическим построением.

4. Длина L_1 рабочей части фрезы может быть принята по табл.13.22 из [9].

5. Полная длина фрезы $L = L_1 + 2l_6$, где $l_6 = 3...5$ мм длина буртика.

6. Диаметр буртика $d_6 = d_a - 2H = (1...2)$ мм.

7. Диаметр отверстия под оправку рассчитывается по формуле:

$$d_o = 20m_{\text{пр}}^{0,373}.$$

Полученное значение округляется до ближайшего большего стандартного в соответствии с ГОСТ 9472-90. Там же выбираются размеры шпоночного паза с отклонениями.

8. Диаметр выточки в отверстии равен $d_w = d_o + 2$ мм.

9. Длина шлифованной части отверстия с каждой стороны:

$$l_1 = (0,2...0,3)L.$$

4.6. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЧЕРВЯЧНОЙ ФРЕЗЫ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЗВЕЗДОЧКИ

Исходные данные: шаг цепи 25,4 мм; диаметр ролика 15,88 мм; число зубьев звездочки 16.

Решение. 1. Выполняем геометрический расчет параметров звездочки:

а) число зубьев звездочки находится в рекомендуемых пределах: $z_{\min} = 9 + 0,2t = 14 < z \leq z_{\max} = 120$;

б) диаметр делительной окружности: $d_1 = 130,196$ мм; радиус $r_1 = 65,098$ мм;

в) геометрическая характеристика зацепления: $\lambda = t/d_w = 1,6$;

г) коэффициент высоты зуба $K = 0,532$;

д) диаметр окружности выступов $d_{a1} = 141,207$ мм;

е) радиус впадины $r = 8,03$ мм;

ж) радиус сопряжения $r_c = 20,734$ мм;

з) угол сопряжения $\beta = 14,5^\circ$;

и) половина угла впадины, $\alpha = 51,25^\circ$;

к) половина угла охвата зуба $\varphi = 13^\circ$;

л) радиус головки зуба $r_2 = 10,752$ мм;

м) длина прямого участка профиля $FG f = 1,249$ мм;

н) смещение центров дуг впадин $e = 0,762$ мм.

2. Определяем параметры точек профиля детали.

В ходе расчетов приняты:

а) наружный диаметр $d_{a0} = 125$ мм;

б) число зубьев фрезы $z_0 = 10$ мм;

При выборе данных параметров использованы рекомендации табл.4.1.

Таблица 4.1

Выбор параметров червячной фрезы

Шаг цепи, мм	8	9,525	12,7	15,875	19,05	25,4	31,75	38,1
Наружный диаметр фрезы, мм	70	80	90	100	112	125	140	160
Число зубьев	12					10		

Результаты расчета параметров профиля детали сведены в (табл.4.2).

3. Результаты расчета координат точек профиля инструментальной рейки и основного червяков приведены в табл.4.3.

в) начальный диаметр основного червяка $d_{нч} = 106,141$ мм;

г) полная высота профиля зуба $h_0 = 13,535$ мм;

д) задний угол на вершине зуба фрезы $\alpha_a = 110^\circ$; первое за тылование $K = 8,0$ мм;

е) угол подъема винтовой линии на начальном цилиндре $\lambda_{нч} = 4,4^\circ$;

ж) осевой шаг зубьев фрезы $P_o = 25,639$ мм;

з) нормальный шаг зубьев фрезы $P_n = 25,564$ мм.

м) радиус дна канавки $r_3 = 3,5$ мм.

4. Результаты расчета координат точек профиля червячной фрезы приведены в табл.4.4.

5. Конструктивные элементы фрезы:

а) диаметр посадочного отверстия $d_o = 40$ мм;

б) диаметр выточки $d_b = 42$ мм;

в) диаметр буртиков $d_6 = 60$ мм;

г) длина буртика $l_6 = 5$ мм;

д) общая длина фрезы $L = 125$ мм;

е) длина центрирующих поясков $l_1 = 32$ мм;

ж) ширина шпоночного паза $B = 10$ мм;

Таблица 4.2

Узловые точки профиля звездочки

Искомая величина	Точка										
	A	B	1	2	3	E	4	F	G	5	K
Параметры детали											
r, мм	57,068	57,068	57,665	58,370	59,308	60,918	62,428	64,016	65,666	66,264	68,820
δ , град.	0	0,383	3,174	4,408	5,466	5,606	6,426	7,089	7,600	7,755	8,199
ξ , град.	90	89,617	66,326	54,842	43,534	33,143	27,490	21,993	16,649	16,343	21,668

Примечание: значения δ , ξ для левой стороны профиля принимаются со знаком «+», а для правой — со знаком «-».

Таблица 4.3

Расчетные параметры профиля инструментальной рейки и основного червяка

Искомая величина	Точка										
	A	B	1	2	3	E	4	F	G	5	K
Параметры профиля инструментальной рейки											
x_p , мм	8,030	8,028	-7,503	-6,875	-6,028	-4,436	2,839	-1,130	0,537	1,011	1,320
z_p , мм	0	0,428	3,237	4,527	5,684	5,977	7,100	8,012	8,618	8,735	8,797
u_p , град.	90	89,665	69,164	58,914	48,664	38,413	31,711	24,242	14,885	12,570	9,727
Параметры профиля основного червяка											
r_a , мм	61,100	61,098	60,574	59,947	59,099	57,508	55,910	54,201	52,533	52,060	50,864
δ_a , град.	0	6,026	-45,556	-63,710	-80,005	-84,111	-99,973	-112,820	-121,367	-123,003	-126,522

Примечание: значения δ для левой стороны профиля принимаются со знаком «+», а для правой со знаком «-».

Таблица 4.4

Расчетные параметры профиля червячной фрезы

Искомая величина	Точка									
	A	B	1	2	3	E	4	F	G	K
Координаты точек режущей кромки фрезы в плоскости передней поверхности (левая сторона)										
x_{O_1} , мм	61,100	61,099	60,573	59,945	59098	57,506	55,907	54,198	52,529	50,860
y_{O_1} , мм	0	0,377	0,283	0,392	0,485	0,496	0,573	0,627	0,654	0,668
z_{O_1} , мм	0	0,426	3,225	4,511	-5,664	-5,957	-7,078	-7,988	-8,593	-9,941
Координаты точек режущей кромки фрезы в нормальной плоскости (левая сторона)										
x_{O_2} , мм	61,100	61,099	60,573	59,945	59098	57,506	55,907	54,198	52,529	50,860
z_{O_2} , мм	0	-0,428	-3,238	-4,528	-5,685	-5,978	-7,101	-8,013	-8,618	-9,965

Примечание: знаки для координат y и z точек правой стороны профиля обратны левой стороне.

- з) высота шпоночного паза $C_1 = 43,5$ мм;
- и) второе затылование $K_1 = 12,0$ мм;
- к) глубина стружечной канавки $H = 28$ мм;
- л) угол стружечной канавки $\theta = 25^\circ$;
- м) радиус дна канавки $r_3 = 3,5$ мм.

4.7. ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ЧЕРВЯЧНОЙ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПРЯМОБОЧНЫХ ШЛИЦЕВ

Исходными данными для расчета служат параметры нарезаемого плицевого вала (см. рис.2.2): наружный диаметр d_{a1} , число зубьев z_1 , внутренний диаметр d_{f1} , ширина шлица b_1 , поля допусков на диаметры и ширину, размеры фаски c_1 на вершине зуба.

Тогда расчетные размеры вала будут:

1) расчетный наружный диаметр $D_p = d_{a1\max} + 2c_1$, где $d_{a1\max}$ — максимальный наружный диаметр;

2) расчетный внутренний диаметр $d_p = d_{f1\min} + 0,25\delta_d$, где δ_d — допуск на внутренний диаметр d_{f1} ; $d_{f1\min}$ — минимальный внутренний диаметр;

3) расчетная ширина шлица $b_p = b_{1\min} + 0,25\delta_b$, где δ_b — допуск на ширину шлица; $b_{1\min}$ — минимальная ширина. Тогда $q_1 = 0,5b_p$.

Расчет выполняется в следующей последовательности.

1. Минимально допустимый радиус начального цилиндра

$$r_{w1} = 0,5 \cdot D_p^2 - 0,75b_p^2.$$

В случае отсутствия фаски на вершине зуба $r_{w1} = r_{a1}$. Точность расчета 0,1 мм с округлением в большую сторону.

2. Профильный угол шлица на начальной окружности

$$\sin \gamma_{w1} = b_p / 2r_{w1}.$$

3. Угловой параметр обкаточного движения, соответствующий обработке точки профиля шлица на окружности впадин

$$\cos \delta_{\max} = \frac{d_p^2 - b_p^2}{2r_{w1}}.$$

4. Угловые параметры, обеспечивающие наилучшую замену теоретической кривой дугой одной окружности

$$\delta_1 = \gamma_{w1} + k_1(\delta_{\max} - \gamma_{w1}); \delta_2 = \gamma_{w1} + k_2(\delta_{\max} - \gamma_{w1}),$$

где $k_1 = 0,3 \dots 0,5$; $k_2 \approx 0,8$.

5. Координаты точек профиля $A_i(x, y)$:

$$\begin{aligned}x_i &= r_{w1}(\delta_i - \gamma_{w1} - \sin\delta_i \cos\delta_i) + 0,5b_p \cos\delta_i; \\y_i &= \sin\delta_i(r_{w1} \sin\delta_i + 0,5b_p).\end{aligned}$$

Значения γ_{w1} и δ_i подставляются в радианах.

6. Координаты центра заменяющей окружности и ее радиус (см. рис.2.3):

$$\begin{aligned}x_o &= \frac{(x_2^2 + y_2^2)y_1 - (x_1^2 + y_1^2)y_2}{2(x_2y_1 - x_1y_2)}; \\y_o &= \frac{(x_1^2 + y_1^2)x_2 - (x_2^2 + y_2^2)x_1}{2(x_2y_1 - x_1y_2)}; \\p_o &= \sqrt{x_o^2 + y_o^2}.\end{aligned}$$

7. Наибольшая погрешность замены теоретического профиля дугой одной окружности

$$\Delta f = |\Delta p_1| + |\Delta p_2|$$

где $\Delta p_1, \Delta p_2$ — наибольшие отклонения теоретического профиля от дуги заменяющей окружности, равные

$$\Delta p_{1,2} = r_{w1}(\sin\delta_{m1,2} - \sin\gamma_{w1}) \frac{y_p}{\sin\delta_{m1,2}} p_o;$$

δ_{m1}, δ_{m2} — угловые параметры, при которых отклонения будут наибольшими:

$$\delta_{m1,2} = \frac{r_{w1}\gamma_{w1} + x_o}{2r_{w1} + 2\frac{y_o}{3}} \left[\frac{r_{w1}\gamma_{w1} + x_o}{2r_{w1} + 2\frac{y_o}{3}} \right]^2 + \frac{y_o}{r_{w1} + \frac{y_o}{3}}.$$

Знак «-» в формуле принимается при расчете δ_{m1} , а знак «+» — при расчете δ_{m2} .

8. Если $\Delta f \leq 2\delta_b/3$, то теоретический профиль заменяется одной дугой окружности (см. рис.2.3). Если же условие не выполняется, то осуществляется замена точного профиля дугами двух окружностей (рис.4.12).

Угловой параметр δ_2 точки $A_2(x_2, y_2)$ сопряжения дуг заменяющих окружностей в этом случае равен

$$\cos\delta_2 = \frac{r_{y12} - q_1^2}{r_{w1}},$$

где $r_{y12} = r_{a1} - (0,3 \dots 0,4)(r_{a1} - r_{f1})$ — радиус точки на профиле шлицевого вала, соответствующей точке A_2 .

Угол $\delta_1 \approx 0,5(\delta_2 + \gamma_{w1})$, угол $\delta_3 \approx \delta_{\max}$ (см. п.3) с округлением до целых градусов.

По формулам п.5 можно найти координаты точек A_1 , A_2 , A_3 , подставляя соответственно значения δ_1 , δ_2 , δ_3 .

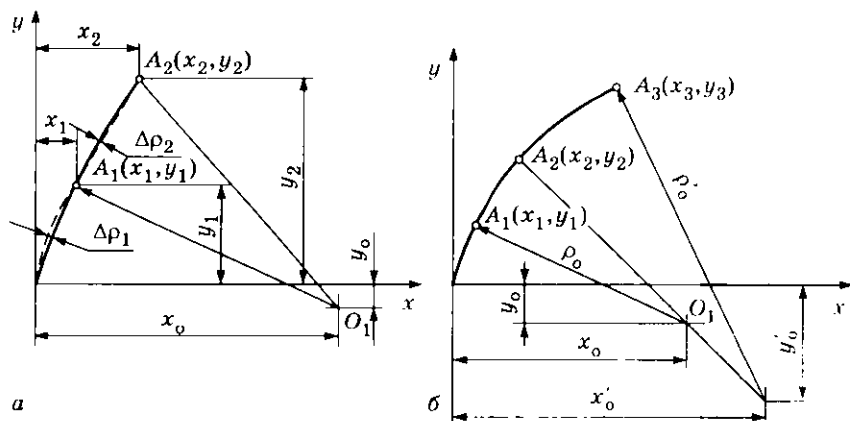


Рис.4.12. Схемы замены кривой профиля боковой стороны зуба дугами окружностей

Координаты центра и радиус дуги первой из этих окружностей (рис.4.12) можно найти по формулам п.6, используя координаты точек A_1 и A_2 . Радиус дуги второй заменяющей окружности и координаты ее центра можно найти, используя координаты точек A_2 и A_3 :

$$\rho'_0 = \frac{x_3 - x_2}{2 \cos \delta \cos(\delta + \varepsilon)};$$

$$x'_0 = x_2 + \rho'_0 \cos \varepsilon;$$

$$y'_0 = y_2 - \rho'_0 \sin \varepsilon;$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2};$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{y_2 - y_0}{x_0 - x_2}.$$

9. Высота головки зуба червячной фрезы

$$h_{a0 \text{ ун}} = r_{w1} \sin \delta_{\max} (\sin \delta_{\max} - \sin \gamma_{w1}).$$

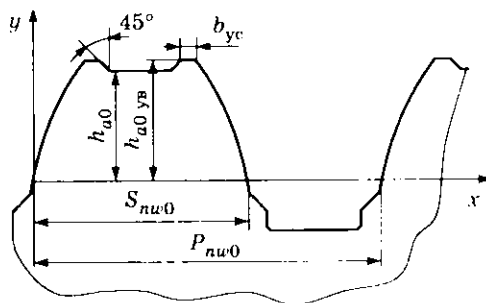


Рис.4.13. Параметры зубьев червячной шлицевой фрезы

10. Высота участка зуба, обрабатывающего окружность впадин шлицевого вала и ширина усика (рис.4.13) равны

$$h_{a0} = r_{w1} + r_{f1}; \quad 0,3 \text{ мм} < b_{yc} < 0,8 S_k,$$

где S_k — ширина канавки на шлицевом валике для выхода шлицевого круга.

Если такая канавка отсутствует, то следует проектировать фрезу определенной установки (см. разд.2.1). В противном случае, если работать червячной шлицевой фрезой без усиков, на боковой стороне шлицев вблизи внутреннего диаметра останется переходная кривая и центрирование шлицевого вала по внутреннему диаметру будет невозможно.

11. Шаг винтовой нарезки фрезы в нормальном сечении

$$P_{nw0} = \frac{2\pi r_{w1}}{z_1}.$$

12. Толщина зуба по начальной прямой в нормальном сечении

$$S_{nw0} = P_{nw0} \frac{2r_{w1}}{z_{w1}}.$$

13. Впадина зуба фрезы в нормальном сечении имеет следующие размеры:

— высота фаски (рис.4.14, а) $h_{фy} \approx 2c_1$, где c_1 — фаска на шлицевом валике; при этом необходимо, чтобы $h_{фy} > 0,5d_{a1\max}$

r_{w1} ;

— угол фаски

$$\sin \varepsilon_{ф} = \frac{\rho_{ф}^2 + [0,5d_{a1} \sin(45^\circ + \mu)]^2}{r_{w1}};$$

$$\sin \mu = \frac{S_{nw0} - h_{\Phi y}}{d_{a1}};$$

$$\rho_{\Phi} = \frac{d_{a1} - c_1}{2};$$

— смещение фаски от начальной прямой $e_{\Phi} = h_p^2 / 16r_{w1}$.

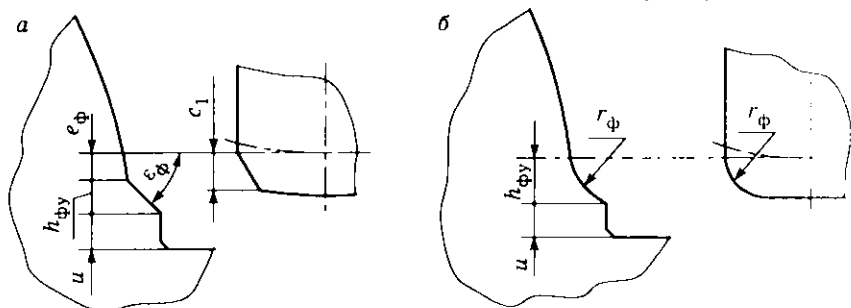


Рис.4.14. Параметры впадин зубьев червячной шлицевой фрезы

Если шлиц имеет закругление вершины с радиусом r_{Φ} (рис.4.14, б), то центр закругления у основания зуба фрезы расположен на начальной прямой, его радиус равен r_{Φ} , $e_{\Phi} = 0$.

Глубина канавки для затылованных фрез $u = 1,5 \dots 3$ мм.

14. Наружный диаметр фрезы можно найти, как

$$d_{a0} = 5(6,5 + 0,436P_{nw0}).$$

Полученное значение округляется в большую сторону до величины, кратной 5, и уточняется по паспортным данным станка.

15. Число зубьев фрезы можно найти, как

$$z_0 = 2(4,5 + 0,057P_{nw0})$$

с округлением до ближайшего целого четного числа.

16. Спад кулачка для затылования

$$K = \frac{\pi d_{a0}}{z_0} \operatorname{tg} \alpha_a,$$

где $\alpha_a = 10 \dots 12^\circ$ — задний угол по вершинам зубьев.

Для фрез с двойным затылованием $K_1 = (1,2 \dots 1,5)K$. Окончательно K и K_1 округляются до ближайших больших значений по стандартному ряду кулачков.

17. Расчетный диаметр условного среднего цилиндра находится, как

$$d_0 = d_{a0} - 2h_{a0} - 0,3K.$$

18. Угол подъема витков фрезы

$$\gamma_{m0} = \frac{P_{nw0}}{\pi d_0}.$$

19. Осовой шаг винтовой нарезки фрезы

$$P_{x0} = \frac{P_{nw0}}{\cos \gamma_{m0}}.$$

20. Шаг винтовых стружечных канавок

$$P_{z0} = \pi d_0 \operatorname{ctg} \lambda_{m0},$$

принимая $\lambda_{m0} = \gamma_{m0}$.

21. Глубина стружечных канавок фрез

$$H_k = h_{a0} + \frac{K + K_1}{2} + e_{\phi} + h_{\phi} + u + r,$$

где $r = 1...4$ — радиус дна стружечной канавки, мм.

22. Угол стружечной канавки принимается из конструктивных и технологических соображений в зависимости от числа зубьев фрезы: при $z \leq 8$ — 25 или 30° ; при $z = 10$ — 22° ; при $z = 12$ — 18° .

23. Общая длина фрезы

$$L \approx (r_{f1} + r_{a1} - r_{f1}) + (2...0,5)P_{nw0} + 2l_6,$$

где $l_6 = 4...5$ мм — длина буртика.

24. Диаметр отверстия под оправку выбирается из соотношения

$$d_0 \leq 0,625(d_{a0} - 2H).$$

Окончательное его значение уточняется по ГОСТ 9472-90 из ряда 16; 22; 27; 32; 40 и 50 мм. Здесь же назначаются размеры шпоночного паза.

25. Диаметр буртика принимается равным

$$d_6 = d_{a0} - 2H_k \quad (2...4).$$

26. Диаметр отверстия находится, как

$$d_0 \approx (0,55...0,62)(d_{a0} - H_k).$$

Полученное значение уточняется по ГОСТ 9472-90 из ряда 16; 22; 27; 32; 40; 50 и 80 мм. Здесь же назначаются размеры шпоночного паза C_1 .

27. Конструктивное оформление фрезы близко показанному на рис.2.6. По ГОСТ 8027-86 определяются допуски на все элементы червячной фрезы и технические требования к ее изготовлению с учетом класса точности (A, B, C).

Выполняется рабочий чертеж фрезы с учетом всех требований (табл.4.5).

Таблица 4.5

Таблица к чертежу червячной шлицевой фрезы

Направление витков		
Угол подъема витков	γ_{m0}	
Шаг зубьев по нормали	P_{nw0}	
Толщина зубьев по нормали	S_{nw0}	
Угол наклона стружечных канавок	λ_{m0}	
Шаг стружечных канавок	P_{z0}	
Расчетный диаметр	d_0	
Класс точности фрезы		
Накопленная погрешность окружного шага стружечных канавок	F_{p0}	
Направление стружечных канавок	f_v	
Осевой шаг фрезы	f_{px0}	
Винтовая линия фрезы на одном обороте	f_{h0}	
Профиль передней поверхности	f	
Отклонение окружного шага между « n » соседними шагами	$f_{p_{\tau,0}}$	

Глава 5

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДОЛБЯКОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕЭВОЛЬВЕНТНЫХ ПРОФИЛЕЙ

5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Зубчатые профили на поверхности ряда деталей не могут быть обработаны напроход такими инструментами, как червячные шлицевые фрезы. В этом случае целесообразно использовать долбяки, например, при обработке валиков и отверстий, непосредственно за которыми следуют уступы или приливы. Будучи спроектированными для обработки конкретного профиля, такие долбяки являются специальными инструментами.

Исходными данными для расчета являются:

- 1) координаты точек x_{i1} , y_{i1} или уравнение $y_1 = f(x_1)$ профиля детали;
- 2) радиус наружной окружности r_{a1} ;
- 3) радиус внутренней окружности r_{f1} ;
- 4) координаты крайних точек профиля детали x_{a1} , y_{a1} и x_{f1} , y_{f1} ;
- 5) передаточное число i между валом и долбяком;
- 6) угол φ_{i1} между касательной к точке профиля и осью O_1 ($\operatorname{tg} \varphi = dy/dx$).



Рис.5.1. Схемы к формулировке 1-го условия обрабатываемости:
а, б — профиль может быть обработан;
в — профиль не может быть обработан

Перед началом расчета необходимо выполнить анализ условий обрабатываемости. Первое условие оговаривает, что нормали к профилю в любой точке должны пересекать начальную окружность (рис.5.1), причем в последовательном порядке. Его математическое выражение имеет вид

$$x_{i1} \cos \alpha_{i1} + y_{i1} \sin \alpha_{i1} \leq r_{i1},$$

где α_{i1} — угол между касательной к профилю и осью X .

Согласно **второму** условию, если линия зацепления в системе координат исходного профиля имеет точку максимума или минимума, а в системе координат сопряженного профиля такой точки не имеет, то обработку профиля осуществить полностью невозможно. Математически второе условие можно записать, как $d\rho_{OЛ}/d\Theta_{OЛ}$ где $\rho_{OЛ}$ — радиус-вектор точки инструмента, лежащей на линии зацепления; $\Theta_{OЛ}$ — полярный угол точки.

Третье условие гласит, что неплавный переход участков профиля изделия может быть обработан только тогда, когда угол ε между касательными, проведенными к участкам в точке пересечения, равен или меньше 180° ; в противном случае обработка невозможна и на детали формируется переходная кривая.

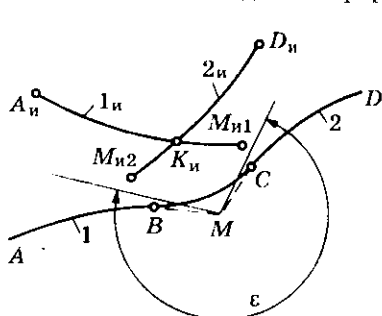


Рис.5.2. Схема к формулировке 3-го условия обрабатываемости

Возникновение этих кривых можно проиллюстрировать следующим образом. Предположим, что профиль изделия представляет собой два криволинейных отрезка, имеющих неплавное соединение в точке M при $\varepsilon > 180^\circ$ (рис.5.2). Сопряженные поверхности инструмента будут пересекаться в точке $K_{и}$, и каждая будет разделяться этой точкой на два участка: кривая $A_{и}M_{и1}$ — на участки $A_{и}K_{и}$ и $K_{и}M_{и1}$; кривая $D_{и}M_{и2}$ — на $D_{и}K_{и}$ и $K_{и}M_{и2}$.

Участки $A_{и}K_{и}$ и $D_{и}K_{и}$ могут быть сформированы на инструменте, а из $K_{и}M_{и1}$ и $K_{и}M_{и2}$ может быть получен только один. Если же эти участки отбросить, на обрабатываемом контуре возникнет участок в виде плавной кривой, которая и называется переходной.

В общем случае расчет профиля производится в следующей последовательности.

1. Выбор радиуса начальной окружности детали, который зависит от сочетания условий обрабатываемости. Для профилей, не зависящих от первых двух условий, радиус начальной окружности теоретически может лежать в пределах от 0 до x , но наименьшее его значение рекомендуется $r_{w1} > r_{a1}(1 + u)$.

Если профиль зависит от первого условия обрабатываемости, то

$$r_{w1\min} = (x_{i1} \cos \varphi_{i1} + y_{i1} \sin \varphi_{i1})_{\max}.$$

Если профиль зависит от второго условия обрабатываемости и задан в параметрических координатах $[\rho_1 = \rho(t); \Theta_1 = \Theta(t)]$, то $r_{w1} = \rho(t_k)$. Параметр t_k находим из уравнения

$$\rho_1 \frac{d\rho_1}{dt} - A \cos \Theta_1 \frac{d\rho_1}{dt} + A \rho_1 \sin \Theta_1 \frac{d\Theta_1}{dt} = 0,$$

где A — межосевое расстояние.

2. Радиус начальной окружности долбяка $r_{w0} = r_{w1} / u$.

3. Межосевое расстояние $A = r_{w0} + r_{w1}$.

4. Уравнение линии зацепления в прямоугольных координатах определяется по формулам:

$$a_{i1} = x_{i1} \sin \varphi_{i1} - y_{i1} \cos \varphi_{i1} + r_{i1} \sin \psi_{i1};$$

$$\xi_{i1} = a_{i1} \cos \psi_{i1}; \quad \eta_{i1} = a_{i1} \sin \psi_{i1};$$

$$\psi_{i1} = \arccos \frac{x_{i1} \sin \varphi_{i1} + y_{i1} \cos \varphi_{i1}}{r_{i1}}.$$

5. Координаты точек профиля долбяка в исходном сечении

$$x_{i0} = A \sin u \Theta_{i1} - x_{i1} \cos(1 + u) \Theta_{i1} + y_{i1} \sin(1 + u) \Theta_{i1};$$

$$y_{i0} = A \cos u \Theta_{i1} + x_{i1} \sin(1 + u) \Theta_{i1} + y_{i1} \cos(1 + u) \Theta_{i1};$$

$$\Theta_{i1} = \varphi_{i1} + \mu_{i1} - 90^\circ;$$

$$\cos \mu_{i1} = \frac{x_{i1} \sin \varphi_{i1} + y_{i1} \cos \varphi_{i1}}{r_{w1}}.$$

На практике, как правило, используют упрощенные методы проектирования. Рассмотрим это на примере долбяка для обработки прямобочного шлицевого вала.

5.2. РАСЧЕТ ДОЛБЯКОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ШЛИЦЕВЫХ ВАЛОВ С ПРЯМОБОЧНЫМ ПРОФИЛЕМ

5.2.1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Долбяки в обычном исполнении предназначены для обработки валов всех серий при центрировании по наружному диаметру и боковым сторонам. В случае центрирования по внутреннему диаметру используются долбяки с «усиками». В качестве исходных данных задаются номинальные наружный диаметр d_{a1} , внутренний диаметр d_{f1} и толщина шлица b_1 , допуски на эти параметры, число шлицев z_1 , фаска c_1 на вершине зуба. Их можно принимать по ГОСТ 1139-80*.

Тогда расчетные размеры будут:

-- наружный диаметр $D_p = d_{a1\min} + 0,25\delta_D$, где δ_D -- верхнее предельное отклонение номинального наружного диаметра d_{a1} ;

-- внутренний диаметр $d_p = d_{f1\min} + 0,25\delta_d$, где δ_d -- допуск на внутренний диаметр d_{f1} ; $d_{f1\min}$ -- минимальный внутренний диаметр;

-- ширина шлица $b_p = b_{1\min} + \delta_b$, где δ_b -- допуск на ширину шлица; $b_{1\min}$ -- минимальная ширина.

Если валик обрабатывается с припуском под шлифование, расчетные размеры следует увеличить на его среднее значение согласно табл.5.1.

Расчет производится в следующей последовательности.

1. Радиус окружности начала фаски шлицевого вала

-- без припуска на шлифование:

$$r_\phi = d_{a1\max} / 2 - c_1,$$

где $d_{a1\max}$ -- максимальный диаметр шлицевого вала с учетом поля допуска;

-- с припуском на шлифование

$$r_\phi = D_p / 2 - c_1.$$

2. Число зубьев долбяка $z_0 = (1,5...2)z_1$.

Таблица 5.1

Припуски под шлифование шлицевых валов

Номинальный внутренний диаметр вала, мм	Припуск на шлифование, мм	
	минимальный	максимальный
До 30	0,25	0,35
Свыше 30 до 50	0,30	0,40
Свыше 50 до 80	0,40	0,50
Свыше 80	0,45	0,55

3. Передаточное отношение $u = z_1/z_0$.

4. Радиус начальной окружности долбяка.

Допустим, что радиусы начальных окружностей долбяка и вала равны r_{w0} и r_{w1} , начало координат находится в центре долбяка -- точке O_0 , а ось Y проходит через полюс зацепления P . В этом случае точка P , лежащая на начальной окружности долбяка на оси Y , сопряжена с точкой P профиля изделия. При повороте детали по часовой стрелке на угол ϕ_1 система координат XY вместе с начальной окружностью долбяка повернется на угол ϕ_0 (рис.5.3), причем

$$\phi_0 = \phi_1(r_{w1}/r_{w0}) = \phi_1 u.$$

Нормаль PA в этом случае является одновременно и нормалью к профилю долбяка. Координаты точки A можно найти, как

$$\begin{cases} x = r_{w0} \sin \varphi_0 - r_{w1} [\sin(\varphi_1 + \gamma_w) - \sin \gamma_w] \cos \{[(1+u)/u] \varphi_0 + \gamma_w\}; \\ y = r_{w0} \cos \varphi_0 - r_{w1} [\sin(\varphi_1 + \gamma_w) - \sin \gamma_w] \sin \{[(1+u)/u] \varphi_0 + \gamma_w\}, \end{cases}$$

где $\sin \gamma_w = a_1 / r_{w1}$; a_1

расстояние от прямой профиля детали до центра начальной окружности.

Приведенная выше формула является общей для всех типов валов с прямолинейным профилем и действительна для случая, когда передний угол долбяка равен нулю. При положительном переднем угле требуется корректировка профиля.

При выборе диаметра начальной окружности детали следует стремиться к его оптимальному значению с учетом отсутствия среза вершины профиля детали. В данном случае можно рекомендовать

$$r_{w1} = \sqrt{r_{a1}^2 - a_1^2 \frac{3+2u}{(2+u)^2}}.$$

Применительно к рассматриваемому нами случаю

$$r_{w1} = \sqrt{r_{\phi}^2 - \frac{b_1^2 (3+2u)}{4(2+u)^2}},$$

где r_{ϕ} — радиус окружности начала фаски шлицевого вала (см. рис. 4.10).

5. Радиус начальной окружности долбяка $r_{w0} = r_{w1} / u$.

6. Угол профиля шлицевого вала по начальной окружности

$$\sin \gamma_{w1} = b_1 / 2r_{w1}.$$

7. Высота рабочего участка профиля детали $h_{f1} = r_{a1} - d_{f1}/2$. Поскольку высота «ножки» профиля шлицевого вала равна высоте «головки» профиля зуба долбяка, имеем $h_{f1} = h_{a0}$.

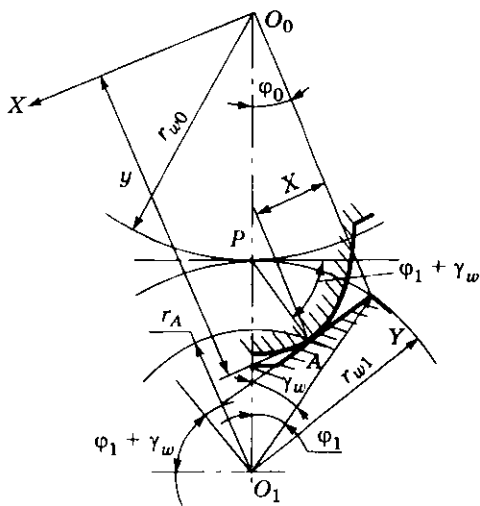


Рис. 5.3. Схема профилирования долбяка для обработки вала с прямобочными шлицами

8. Радиусы узловых точек принимаются равными

$$r_1 = r_{\Phi} - (0,3 \dots 0,5)h_{f1}; \quad r_2 = r_{\Phi} - (0,4 \dots 0,7)h_{f1}.$$

9. Углы профиля в угловых точках

$$\sin \gamma_1 = b_1 / 2r_1; \quad \sin \gamma_2 = b_1 / 2r_2.$$

10. Углы обката узловых точек

$$\cos \alpha_1 = \frac{r_1 \cos \gamma_1}{r_{w1}}; \quad \cos \alpha_2 = \frac{r_2 \cos \gamma_2}{r_{w1}}.$$

11. Углы поворота, долбяка

$$\psi_1 = (\alpha_1 - \gamma_{w1})u; \quad \psi_2 = (\alpha_2 - \gamma_{w1})u.$$

12. Абсциссы узловых точек профиля долбяка

$$x_1 = r_{w0} \sin \psi_1 - r_{w1}(\sin \alpha_1 - \sin \gamma_{w1}) \cos(\psi_1 + \alpha_1);$$

$$x_2 = r_{w0} \sin \psi_2 - r_{w1}(\sin \alpha_2 - \sin \gamma_{w1}) \cos(\psi_2 + \alpha_2).$$

13. Ординаты угловых точек профиля долбяка

$$y_1 = r_{w0} \cos \psi_1 - r_{w1}(\sin \alpha_1 - \sin \gamma_{w1}) \sin(\psi_1 + \alpha_1);$$

$$y_2 = r_{w0} \cos \psi_2 - r_{w1}(\sin \alpha_2 - \sin \gamma_{w1}) \sin(\psi_2 + \alpha_2).$$

Ординаты узловых точек профиля долбяка в плоскости, перпендикулярной задней поверхности при положительном переднем угле γ_a :

$$y'_1 = \frac{y_1 \cos(\gamma_a + \alpha_a)}{\cos \gamma_a}; \quad y'_2 = \frac{y_2 \cos(\gamma_a + \alpha_a)}{\cos \gamma_a},$$

где α_a — задний угол долбяка на вершине зуба.

14. Координаты центра дуги окружности, заменяющей профиль долбяка

$$y_0 = \frac{x_1(x_2^2 + y_2^2) - x_2(x_1^2 + y_1^2)}{2(x_1y_2 - x_2y_1)}; \quad x_0 = \frac{x_1^2 - 2y_0y_1 + y_1^2}{2x_1}.$$

При проектировании долбяков с положительными передними углами вместо значений y_1 и y_2 следует подставлять y'_1 и y'_2 .

15. Радиус заменяющей дуги окружности

$$r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}.$$

16. Шаг зубьев долбяка по начальной окружности $P_{w0} = \pi d_{w0} / z_0$.

17. Толщина зуба долбяка по дуге начальной окружности

$$S_{w0} = d_{w0}(\pi / z_0 - 0,01745\gamma_{w1}).$$

18. Радиус границы прямолинейного участка профиля детали (начала переходной кривой):

$$r_u = r_{w0} \sqrt{1 - 2 \frac{u+1}{(u+2)^2} \sin \gamma_{w1} \left(\sqrt{\sin^2 \gamma_{w1} + \eta(2+u)(2+\eta u)} - \sin \gamma_{w1} \right) - \frac{\eta(2+\eta u)}{(2+u)},}$$

где η — коэффициент высоты ножки шлица, равный

$$\eta = \frac{r_{w1} - r_{f1}}{r_{w1}} = 1 - \frac{r_{f1}}{r_{w1}}.$$

19. Угловой параметр последней точки прямолинейного участка профиля детали при обработке долбяком — точки начала переходной кривой равен $\phi_{1\max}$:

$$\sin(\phi_{1\max} + \gamma_{w1}) = \frac{(1+u) \sin \gamma_{w1} \pm \sqrt{\sin^2 \gamma_{w1} + \eta(u+2)(2+2\eta u)}}{2+u}.$$

20. Угловой параметр ϕ_{a0} последней точки профиля зуба долбяка, расположенной на окружности выступов

$$\phi_{a0} = u \phi_{1\max}.$$

21. Высота переходной кривой равна $h_{п.к.} = r_u - r_{f1}$.

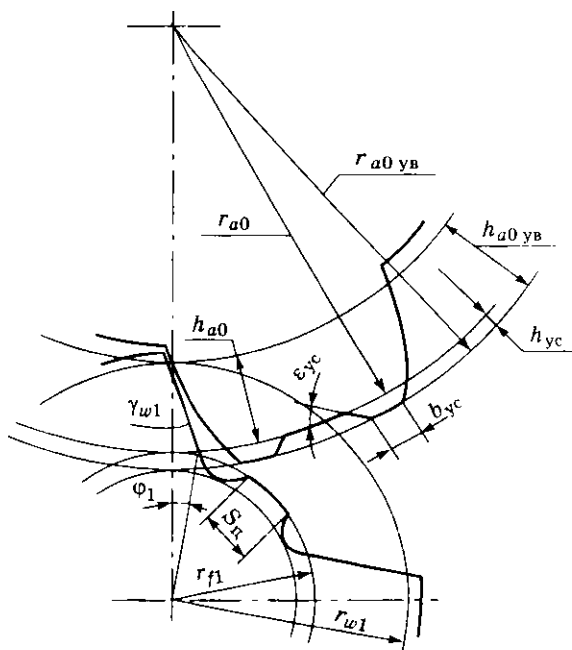


Рис.5.4. Зуб долбяка с «усиками»

Применение долбяков с «усиками» позволяет увеличить прямолинейный участок профиля шлицевого вала за счет увеличения высоты головки зуба долбяка. При этом наружная окружность зубьев долбяка пересекает внутреннюю окружность шлицевого вала (рис.5.4). Расчет долбяка необходимо дополнить следующими пунктами.

22. Полная увеличенная высота зуба

$$h_{a0\text{ув}} = r_{w1} \sin(\varphi'_{1\max} + \gamma_{w1}) [\sin(\varphi'_{1\max} + \gamma_{w1}) - \sin \gamma_{w1}] ,$$

где $\varphi'_{1\max}$ — угловой параметр, обеспечивающий образование прямолинейного участка профиля вала до внутренней окружности и определяемый из выражения

$$\cos(\varphi'_{1\max} + \gamma_{w1}) = \sqrt{(r_{f1} - r_{w1})^2 - \sin^2 \gamma_{w1}} .$$

23. Высота усиков $h_{yc} = h_{a0\text{ув}} - h_{a0}$.

24. Ширина усиков $b_{yc} = (\pi - z_1 - 0,01745 \gamma_{w1} - 0,0349 \mu) S_{ц}$

$S_{ц} : 2$, где $S_{ц}$ — ширина цилиндрического участка впадины (рис.5.4);

$$\mu = \arctg \left(\frac{h_{yc} (2r_{f1} - h_{yc})}{r_{f1} - h_{yc}} - \frac{h_{yc} (2r_{f1} - h_{yc})}{r_{w1}} \right) .$$

25. Угол усика $\varepsilon_{yc} = 45^\circ$.

26. Радиус наружной окружности долбяка с «усиками»

$$r_{a0\text{ув}} = r_{w0} + h_{a0\text{ув}} .$$

5.2.2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДОЛБЯКОВ

27. Передний угол долбяка образуется заточкой передней поверхности по конусу и выбирается в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала. Большие значения передних углов вносят искажения в профиль режущей кромки, приводя к снижению точности нарезаемого профиля. Обычно принимают $\gamma_a = 0-5^\circ$, $\alpha_a = 4-6^\circ$.

28. Боковой задний угол долбяка

$$\operatorname{tg} \alpha_b = \operatorname{tg} \alpha_a \sin \varepsilon_K ,$$

где ε_K — угол между касательной к профилю зуба в рассматриваемой точке K и осью симметрии зуба. Обычно

$$\varepsilon_{K\min} = [(1 + u) / u] \varphi_{1\max} - \psi_{w0} ,$$

где $2\psi_{w0} = S_{w0} / d_{w0}$ — центральный угол зуба долбяка по начальной окружности, рад.

Если $\alpha_6 < 1^\circ 30'$, необходимо увеличить задний угол α_a .

29. Положительное смещение исходного контура $a = 1-3$ мм.

30. Наружный диаметр нового долбяка

$$d_{a0} = 2(r_{w0} + h_{a0} + \text{atg}\alpha_a).$$

31. Величина стачивания долбяка по передней поверхности $H = 2a$.

32. Наружный диаметр сточенного долбяка

$$d_{a0} = 2(r_{w0} + h_{a0} - \text{atg}\alpha_a).$$

33. Высота долбяка $B = 12-16$ мм.

Конструктивные и габаритные размеры долбяков назначаются аналогично размерам долбяков для зуборезных колес.

5.2.3. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗУБЬЕВ ДОЛБЯКА

34. Для контроля толщины зуба зубомером (рис.5.5, а) рассчитываются толщина зуба долбяка по хорде начальной окружности и расстояние этой хорды до вершины зуба долбяка:

$$\bar{S}_{w0} = 2r_{w0} \sin \psi_{w0}; \quad \bar{h}_{a0} = h_{a0} - r_{w0}(1 - \cos \psi_{w0}).$$

35. Размеры трапецевидной скобы (рис.5.5, б) для контроля толщины зуба определяются по этим же формулам, т.е.:

$$S_{ск} = \bar{S}_{w0}; \quad h_{ск} = \bar{h}_{a0}.$$

Угол профиля скобы $\beta_{ск} = 360^\circ : z_0$.

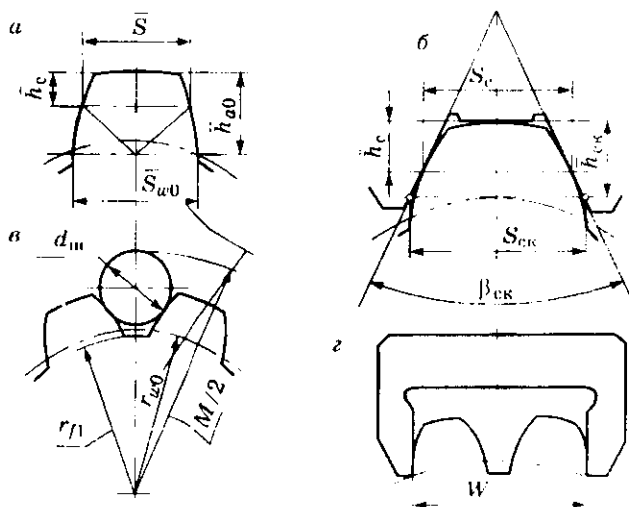


Рис.5.5. Схемы контроля толщины зубьев долбяков: а — зубомером;

б — трапецевидной скобой; в — с помощью шариков;

з — нормалеммером

36. Диаметр шарика или ролика для контроля зуба долбяка

$$d_{ш} = 2r_{w0} \left\{ \frac{\sin(\psi_{1\max} + u\gamma_{w1})}{\cos\left(\frac{1+u}{u}\varphi_{1\max} + u\gamma_{w1}\right)} - u \left[\sin\left(\frac{\varphi_{1\max}}{u} + \gamma_{w1}\right) - \sin\gamma_{w1} \right] \right\};$$

расстояние от центра долбяка до наружной поверхности шарика или ролика (рис.5.5, в)

$$M/2 = 2d_{ш} + r_{w0} \frac{\cos(\varphi_{1\max})/u}{\cos\left(\frac{1+u}{u}\varphi_{1\max} + u\gamma_{w1}\right)}.$$

Задаваясь значением $\varphi_{1\max}$, определяют $M/2$ и $d_{ш}$. Шарик (ролик) размещают во впадине, опираясь на боковые стороны соседних зубьев и не касаясь окружности впадин. Для этого необходимо, чтобы выполнялось условие $M/2 - d_{ш} > r_{f0}$.

37. Размер по длине общей нормали (рис.5.5, г)

$$W = 2r_{w0} \left[(1+u) \sin \frac{\tau_1 u L_n}{2(1+u)} - u \sin \gamma_{w1} \right],$$

где $\tau_1 = 360^\circ/z_1$ — угловой шаг шлицевого вала; L_n — количество зубьев долбяка (целое число), размещающееся на длине общей нормали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баклунов Е.Д. Расчет червячных фрез для зубчатых валов с прямобочным профилем. - М.: МВТУ, 1977. - 32 с.
2. Лашнев С.И., Юликов М.И. Расчет и конструирование режущих инструментов с применением ЭВМ. — М.: Машиностроение, 1975. — 395 с.
3. Металлорежущие инструменты / Г.Н.Сахаров, О.Б.Арбузов, Ю.Л.Боровой и др. - М.: Машиностроение, 1989. - 328 с.
4. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках БЕЙСИК, ФОРТРАН и ПАСКАЛЬ. Томск: МП «РАСКО», 1991. — 272 с.
5. Расчет долбяков фасонных профилей / Под ред. И.И.Семенченко. М.: ЦБТИ, 1951. - 116 с.
6. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием. К.: Вища школа, 1977. - 192 с.
7. Романов В.Ф. Расчеты зуборезных инструментов. М.: Машиностроение, 1969. - 254 с.
8. Сахаров Г.Н. Обкаточные инструменты. М.: Машиностроение, 1983. — 323 с.
9. Справочник инструментальщика / И.А.Ординарцев, Г.В.Филиппов, А.Н.Шевченко и др. М.: Машиностроение, 1987. - 846 с.
10. Фельдштейн Е.Э., Еременко М.Л., Корниевич М.А. и др. Режущий инструмент. Дипломное и курсовое проектирование. — Мн.: Дизайн ПРО, 1997. — 384 с.
11. Цвис Ю.В. Профилирование режущего обкатного инструмента. М.: Машгиз, 1961. - 156 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДИСКОВЫХ ФРЕЗ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВИНТОВЫХ КАНАВОК СТЕРЖНЕВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ.....	4
1.1. Профилирование фасонных фрез	4
1.1.1. Общие сведения	4
1.1.2. Расчет торцовых сечений винтовых канавок	8
1.1.3. Расчет положения дисковой фрезы относительно заготовки	14
1.1.4. Расчет профиля дисковой фрезы.....	15
1.2. Профилирование угловых фрез	20
1.3. Конструктивные элементы дисковых фасонных и угловых фрез	29
Глава 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕЭВОЛЬВЕНТНЫХ ПРОФИЛЕЙ МЕТОДОМ КОПИРОВАНИЯ	32
2.1. Общие сведения	32
2.2. Червячные фрезы для обработки шлицевых валов с углубленным профилем	33
2.3. Фрезы-улитки для обработки шлицевых валов с углубленным профилем	38
2.4. Червячные фрезы для обработки храповых колес	43
Глава 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБКАТОЧНЫХ РЕЗЦОВ	48
3.1. Общие сведения	48
3.2. Общее уравнение поверхности изделия	52
3.3. Общие уравнения поверхности зацепления	53
3.4. Уравнения режущей кромки инструмента для обработки зубчатых изделий по методу зуботочения	56
3.5. Примеры расчетов.....	59

Глава 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕЭВОЛЬВЕНТНЫХ ПРОФИЛЕЙ МЕТОДОМ ОГИБАНИЯ (ОБКАТКИ)	69
4.1. Общие сведения	69
4.2. Параметры номинальной поверхности детали	71
4.3. Определение радиуса начального цилиндра детали	83
4.4. Параметры исходной инструментальной рейки, исходного червяка и профиля зуба червячной фрезы	84
4.5. Конструктивные элементы фрез	87
4.6. Пример расчета червячной фрезы для нарезания звездочки	88
4.7. Приближенный расчет червячной фрезы для обработки прямобочных шлицев	92
Глава 5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДОЛБЯКОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕЭВОЛЬВЕНТНЫХ ПРОФИЛЕЙ	99
5.1. Общие сведения	99
5.2. Расчет долбяков для обработки шлицевых валов с прямобочным профилем	101
5.2.1. Последовательность профилирования	101
5.2.2. Конструктивные элементы долбяков	106
5.2.3. Расчет размеров для контроля зубьев долбяка	107
ЛИТЕРАТУРА	109

Учебное издание

Евгений Эммануилович Фельдштейн
Михаил Анисимович Корниевич

**Режущие инструменты для обработки
неэвольвентных профилей**

Налоговая льгота – Общегосударственный классификатор
Республики Беларусь ОКРБ 007-98, ч.1, 22.11.20.100

Редактор: *Н.В.Овчинникова*
Технические редакторы: *Т.А.Веко, Е.В.Еремина, М.Д.Моисеева*
Корректор: *З.Я.Губашина*

Подписано в печать с оригинал-макета 09.11.2000. Формат 60-90 1/16. Бум. офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7. Тираж 400 экз. Зак. 5223.

Лицензия ЛВ № 93 от 2.12.1997 г.

Издательство «Дизайн ПРО», 220027, г. Минск, пр. Ф.Скорины, 65.
Отпечатано в типографии «Победа» с готовых диапозитивов заказчика,
лицензия ЦПТ №5 от 30.12.97, 222310, г. Молодечно, ул. Таулая, 11.