

УДК 621.9.025.01

Н. П. Малевский, А. В. Мурзаев

ПРОФИЛИРОВАНИЕ СТРУЖЕЧНЫХ КАНАВОК ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РАЗВЕРТОК

Предложен новый алгоритм проектирования и изготовления стружечных канавок разверток с переменным угловым шагом.

Профиль канавок и угловой шаг зубьев. При обработке отверстий развертками с прямыми зубьями и равномерным угловым шагом на поверхности образуются продольные риски. То же наблюдается и при использовании разверток с винтовыми зубьями и равномерным угловым шагом, но в этом случае риски имеют винтовой характер и меньшую глубину. Исследования показали, что применение разверток с неравномерным шагом полностью не снимает риски на обработанной поверхности, но расширяет поле их рассеяния. Выявлено, что значение неравномерного шага зубьев сильно влияет на снижение вибраций, особенно при повышенных режимах развертывания и пониженной жесткости технологической системы. Снижение вибраций существенно повышает качественные параметры поверхности обработанных отверстий. Поэтому все развертки с прямыми зубьями рекомендуется изготавливать с неравномерным угловым шагом, как это показано на рис. 1 к табл. 1.

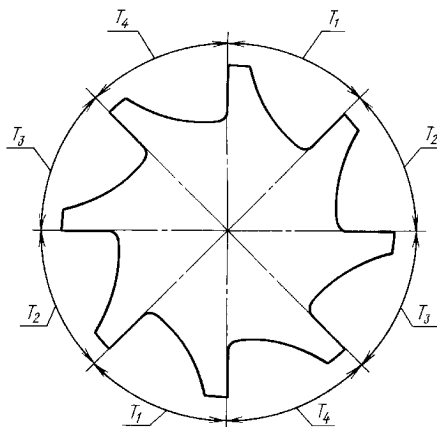


Рис. 1. Неравномерная разбивка угловых шагов зубьев развертки

Неравномерная разбивка угловых шагов зубьев разверток

z	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6	τ_7	τ_8	τ_9	τ_{10}	τ_{11}
4	87°55'	92°05'									
6	58°22'	59°53'	62°05'								
8	41°53'	44°05'	46°06'	47°56'							
10	33°15'	34°32'	36°00'	37°28'	38°45'						
12	27°33'	28°28'	29°34'	30°30'	31°25'	32°30'					
14	23°30'	24°15'	25°00'	25°55'	26°25'	27°00'	27°55'				
16	20°34'	21°08'	21°41'	22°13'	22°46'	23°20'	23°53'	24°25'			
18	17°20'	18°00'	18°40'	19°20'	20°00'	20°40'	21°20'	22°00'	22°40'		
20	15°00'	15°40'	16°20'	17°00'	17°40'	18°20'	19°00'	19°40'	20°20'	21°00'	
22	13°00'	13°40'	14°20'	15°00'	15°40'	16°20'	17°00'	17°40'	18°20'	19°00'	20°00'

Авторы проанализировали литературные источники [1–6], касающиеся конструирования разверток, и ни в одном не была выявлена зависимость высоты зуба от углового шага. В настоящей работе предложено решение этого вопроса.

Профили канавок разверток бывают с прямолинейной и криволинейной спинками зуба, очерченными дугами окружностей. Бóльшее распространение получили развертки с нулевым передним углом режущего клина. На рис. 2, а приведен рекомендуемый для разверток с диаметром d от 3 до 20 мм прямолинейный профиль спинки, обработанный угловой фрезой. Профиль с криволинейной спинкой для разверток с $d = 21 \dots 71$ мм получают с помощью фасонной острозаточенной или затылованной фрезы. Указанное деление формы канавки в зависимости от диаметра развертки рекомендуемое, но не обязательное. В каждом конкретном случае проектирования следует исходить из наличия инструментов второго порядка, угловых или специальных фасонных фрез. В табл. 2 даны эмпирические зависимости для определения профиля и размера стружечных канавок ручных и машинных разверток. Высота зуба H соответствует равномерному угловому шагу ($\tau = 360/z$). При неравномерном угловом шаге зубьев высота каждого зуба H будет разной и подлежит расчету.

Все зубья разверток с неравномерным шагом фрезеруют одной угловой или фасонной фрезой при переменной высоте зуба по правилу: каждому угловому шагу соответствует расчетная высота зуба. Схемы фрезерования зубьев с прямой и криволинейной спинками приведены

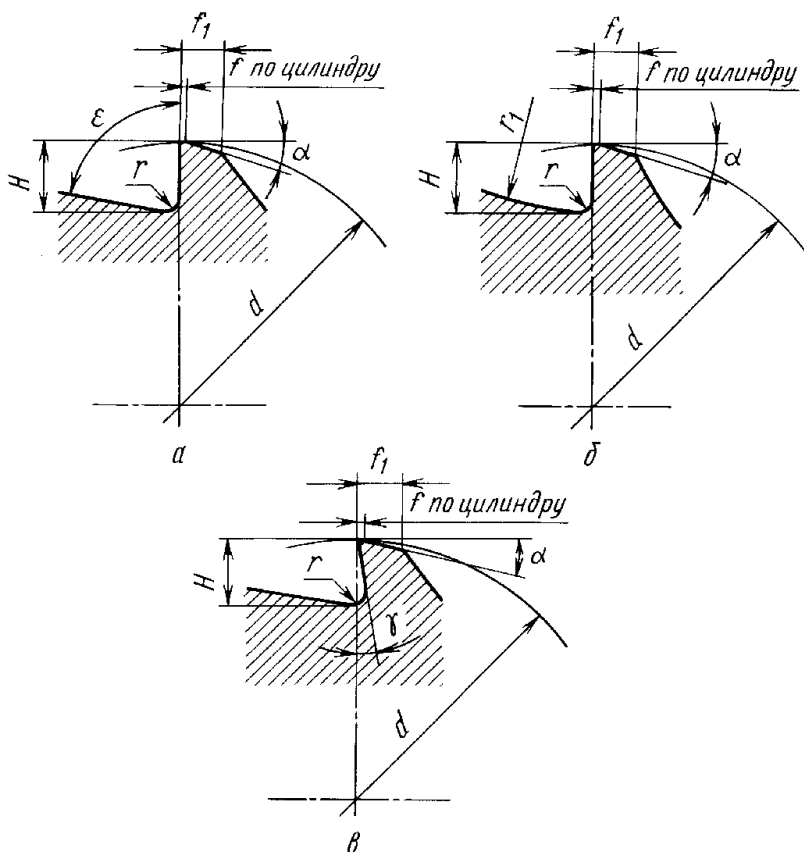


Рис. 2. Виды профилей стружечных канавок разверток:
с прямолинейной (а) и криволинейной (б) спинками зуба, с передним углом γ (в)

на рис. 3. В первом случае угол профиля ε выбирают из ряда одноугловых (инструментальных) фрез с углом $\varepsilon = \{75; 80; 85; 90; 100; 105\}^\circ$ (см. рис. 3, а). Необходимо выбрать такую фрезу, угол профиля ε которой наиболее соответствует другим параметрам развертки. При этом допускается вынужденная коррекция размеров H и f_1 . Также поступают и при фрезеровании криволинейной спинки фасонными фрезами (см. рис. 3, б), которые изготавливают с радиусами $r_f = \{15; 20; 25\}$ мм. При этом также необходимо выбрать фрезу, радиус которой будет наиболее соответствовать другим параметрам развертки.

Образование стружечной канавки развертки с прямолинейной спинкой зуба. Как показано на схеме (см. рис. 3, а), канавку зуба в этом случае получают одноугловой острозаточенной или затылованной фрезой. В наборе фрез применены углы $\varepsilon = \{75; 80; 85; 90; 100; 105\}^\circ$. Для получения стружечных канавок используется группа из шести профилей фрез, достаточная для фрезерования разверток с криволинейной спинкой во всем диапазоне диаметров цельных разверток.

Таблица 2

Эмпирические зависимости для определения параметров зуба разверток из инструментальных сталей

Диаметр развертки d , мм		Число зубьев z	Ширина задней грани f_1 , мм	Предельное отклонение ширины f_1 , мм	Ширина цилиндрической ленточки $f \pm 0,05$ мм	Высота зуба $H \pm 0,1$, мм	Радиус канавки r , мм
ручной	машинной						
3,0...6,0	5,5	6	0,14 $d^{0,7}$	0,04 $d^{0,7}$	0,1	0,22 $d^{0,9}$	0,3
6,3...8,0	6,0...8,0						
8,5...10,0	8,5...10,0						
10,5...20,0	11,0...20,0	8			0,15		0,5
21,0...24,0	21,0...24,0						
25,0...28,0	25,0...28,0						
30,0...34,0	30,0...34,0						
35,0...50,0	35,0...50,0	10	0,1 $d^{0,75}$	0,05 $d^{0,65}$	0,04 $d^{0,6}$	0,11 d	1,0
52,0...71,0	—						
		12				0,1 d	1,2

Примечание. Машинные развертки с цилиндрическим хвостовиком $d = 2,0 \dots 16,0$ мм имеют число зубьев $z = 6$

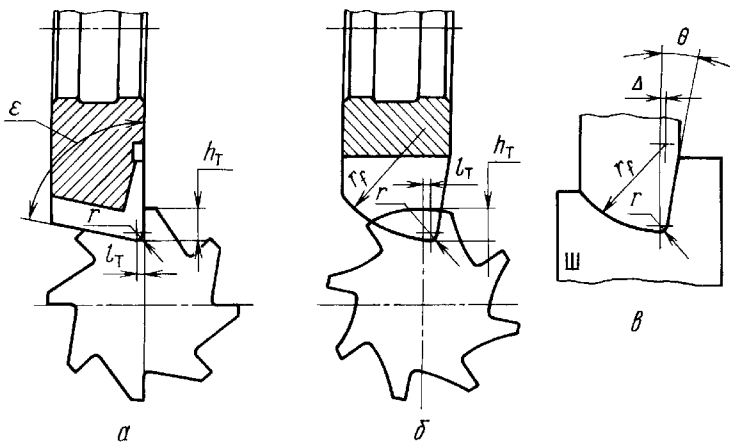


Рис. 3. Схемы фрезерования стружечных канавок:

одноугловой фрезой с углом ε (а), фасонной фрезой радиуса r_f (б). Профиль фрезы с криволинейной спинкой зуба (в)

Графическое профилирование стружечной канавки. Профилирование выполняют в три этапа.

Этап 1. Определение оптимального угла ε при равномерном угловом шаге τ (рис. 4). Построим зуб развертки, для чего отложим на дуге окружности радиуса R угловой шаг τ и отметим точки 1 и 2; от точки 1 отложим высоту зуба H (см. табл. 2) и проведем окружность радиусом дна канавки r ; от точки 2 отложим хорды длиной f_1 и f_T (место А), отметим точки 3 и 4, характеризующие границы поля допуска ширины фаски f_T . Проведем касательную к окружности r так, чтобы она пересекала дугу R в точке 5 между точками 3 и 4. Если полученный угол ε совпадает с углом из ряда стандартных фрез, то построение закончено. Если ближайшие из ряда фрез имеют углы ε_1 или ε_2 , образующие точки 6 и 7, выходящие за пределы участка 3–4, то выбираем тот угол спинки зуба ε_i из стандартного ряда, при котором касательная к окружности r пересекает дугу окружности R как можно ближе к отрезку 3–4. Таким образом, определение угла ε производят итерационным методом.

Этап 2. Определение размеров профиля канавки при равномерном угловом шаге (см. рис. 4). Способом параллельного переноса определим граничные положения стружечной канавки. При смещении канавки к центру развертки на величину ΔH_c спинка зуба займет положение 3– δ_c , а при смещении от центра — положение 4– δ_T . Поставим наибольший размер высоты зуба H_c и величину допуска на высоту зуба T_{H_c} , который равен расстоянию между точками δ_c и δ_T (место В). Укажем, что параметры зуба заданы в “системе вала”.

Этап 3. Определение размеров профиля канавки при неравномерном угловом шаге (см. рис. 5). Повернем вершину зуба из точки 2 в точку

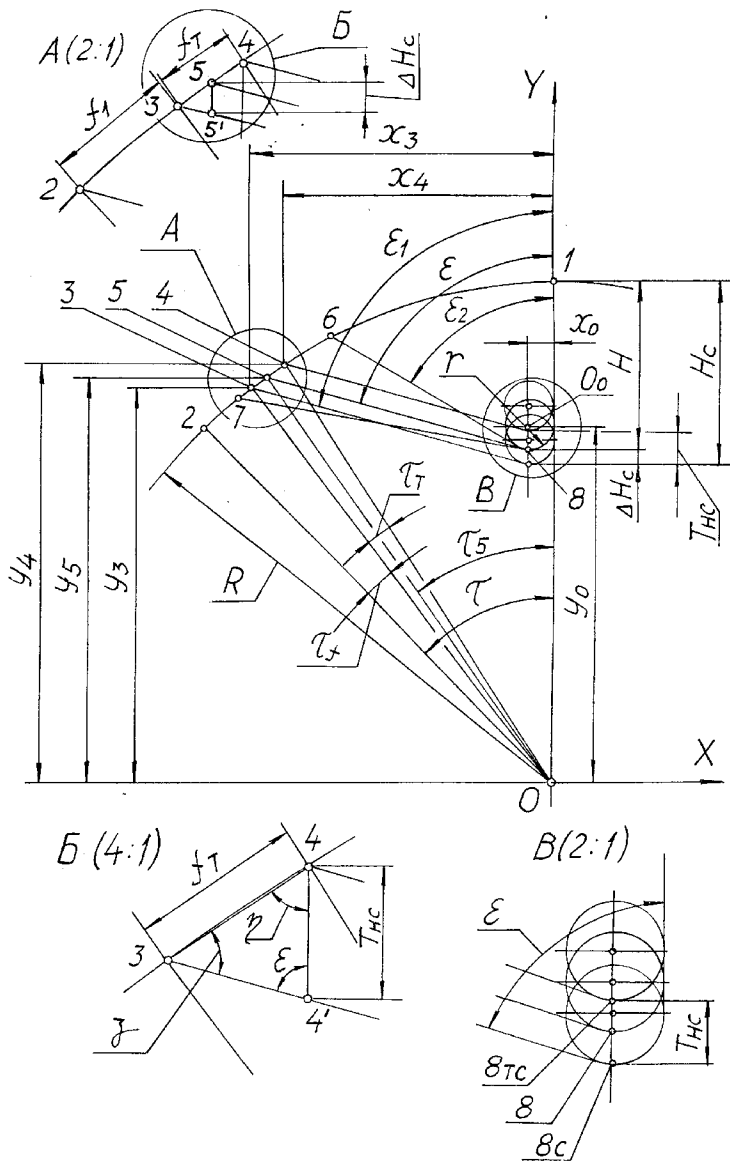


Рис. 4. Определение угла профиля канавки ε с прямолинейной спинкой зуба при равномерном угловом шаге τ

2_j на угол $(\tau_j - \tau)$. При этом размеры хорд f_1 и f_T и углов τ_f , τ_T не изменяются, спинка зуба сохраняет постоянный угол ε с осью Y , а дно канавки займет новое положение. Высота зуба увеличится на ΔH_j и составит размер H_j , характеризуемый точкой δ_j . Допуск на высоту зуба составит величину T_{H_j} . Построения выполняем методом параллельного переноса, описанным ранее во втором этапе.

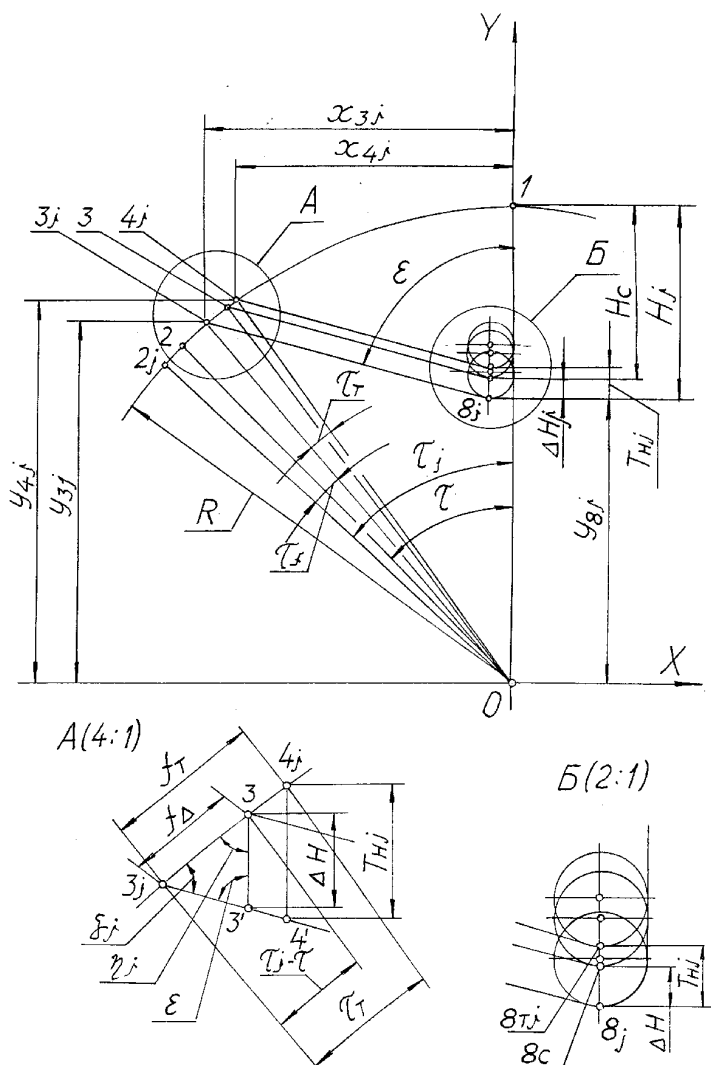


Рис. 5. Определение размеров профиля канавки с прямолинейной спинкой зуба при неравномерном угловом шаге τ_j

Угол τ_j выбирают из табл. 1. При повороте руководствуются следующим правилом: если $(\tau_j - \tau) > 0$, то поворот производят против часовой стрелки; если $(\tau_j - \tau) < 0$ — по часовой стрелке.

Аналитический расчет параметров стружечной канавки. Объекты расчета: угол впадины стружечной канавки ϵ , высота зуба H_c и допуск на высоту зуба T_{H_c} при постоянном угловом шаге или высота зуба H_j и допуск на высоту зуба T_{H_j} при переменном угловом шаге.

Известны параметры развертки: $d, z, f_1, f_T, H, r, \tau_j, \theta = 0, \gamma = 0, \omega = 0$.

Этап 1. *Определение угла ϵ при равномерном угловом шаге τ* (см. рис. 4).

Угловой шаг зубьев

$$\tau = 360^\circ / z; \quad (1)$$

центральный угол фаски f_1 зуба

$$\tau_f = 2 \arcsin(f_1/d); \quad (2)$$

центральный угол отклонения ширины фаски зуба

$$\tau_T = 2 \arcsin(f_T/d); \quad (3)$$

координаты центра радиуса округления дна канавки

$$\begin{cases} x_0 = -r; \\ y_0 = 0,5d - H + r; \end{cases} \quad (4)$$

координаты точки 5 (место A) получим при совместном решении уравнений прямой, касательной к окружности радиуса r и окружности радиуса R :

$$\begin{cases} -(y_5 - y_0) \sin \varepsilon - r = (x_5 - x_0) \cos \varepsilon; \\ y_5^2 + x_5^2 = R^2, \end{cases} \quad (5)$$

где угол ε взят из стандартного ряда значений, приведенных ранее.

Вычислим координату y_5 и угол τ_5 :

$$y_5 = p \pm \sqrt{p^2 - q}; \quad (6)$$

“+” — если $\varepsilon < 90^\circ$; “-” — если $\varepsilon \geq 90^\circ$;

$$\tau_5 = \arccos(y_5/R), \quad (7)$$

где $R = 0,5d$; $a = y_0 - r/\sin(\varepsilon) + x_0 \operatorname{ctg}(\varepsilon)$; $p = a(\sin(\varepsilon))^2$; $q = ap - (R \cos(\varepsilon))^2$.

Угол τ_5 рассчитывают с различными значениями ε , взятыми из стандартного ряда. Нужное значение ε будет соответствовать неравенству

$$\tau - \tau_f > \tau_5 > \tau - \tau_f - \tau_T. \quad (8)$$

Иными словами — точка 5, соответствующая углу τ_5 (см. рис. 4) и стандартному углу ε , должна располагаться в поле допуска на ширину фаски — f_T . Из рис. 4 видно, что при угле ε_1 точка 6 выходит из поля допуска, т.е. увеличивается ширина фаски f_1 , а значит уменьшается площадь канавки. При угле ε_2 имеет место подрез зуба в точке 7.

Этап 2. *Расчет высот зубьев при равномерном угловом шаге* (см. рис. 4). Размеры H_C , T_{H_C} и ΔH_C определяем из косоугольных треугольников (места A и B). Обозначение размеров углов и сторон треугольников, а также последовательность расчетов и номера формул сведены в табл. 3.

Этап 3. *Определение размеров профиля канавки при неравномерном угловом шаге* (см. рис. 5). Размеры H_j , T_{H_j} и ΔH_j определяют из косоугольных треугольников (место A). Обозначение размеров углов и сторон треугольников, а также последовательность расчетов и номера формул сведены в табл. 3.

Верхнее отклонение высоты зуба $es_{H_j} = 0$. Нижнее отклонение высоты зуба $ei_{H_j} = -T_{H_j}$.

Образование стружечной канавки развертки с криволинейной спинкой зуба. Как показано (см. рис. 2, б), канавку зуба в этом случае получают с помощью фасонной острозаточенной или затылованной фрезы. Профиль фрезы имеет прямолинейный участок, расположенный под углом $\theta = 10^\circ$ к вертикали (см. рис. 2, в) и участок, очерченный дугой окружности радиуса r_f . В наборе фрез применены радиусы $r_f = 15, 20, 25$ мм. Центры этих радиусов имеют смещение Δ относительно вертикали. Величина смещения Δ обычно выбирается из ряда $\Delta = 1, 2, 3$ и 4 мм. Прямолинейный и дуговой участки сопрягаются радиусом $r = 0,5; 1,0; 1,2$ мм. Для получения стружечных канавок используется группа из девяти профилей фрез, достаточная для фрезерования цельных разверток с криволинейной спинкой в диапазоне диаметров от 21 до 71 мм.

Графическое профилирование стружечной канавки. Профилирование выполняют в три этапа.

Этап 1. *Определение оптимального радиуса r_f при равномерном угловом шаге τ и минимальном подрезе зуба* (рис. 6). Проведем окружность радиусом $R = 0,5d$, построим угловой шаг $\tau = 360^\circ/z$ и отметим точки 1 и 2 вершин зубьев; отложим расчетную высоту зуба H (см. табл. 2), проведем окружность дна канавки радиусом r . Отложим хорды длиной f_1 и f_T (рис. 6, место A) и получим точки 3 и 4.

Через точку O_0 под углом θ к оси Y проведем прямую, на которой определим положения центров окружностей — точки O_{f_1} , O_{f_2} и O_{f_3} . Положение центров задано размерами ряда $r_f = 15, 20, 25$ мм и условием внутреннего касания с окружностью радиуса r дна канавки. Выбираем окружность радиуса r_f с центром в точке $O_{f_1} = O_f$, которая пересекает окружность радиуса R в точке 5 с минимальным подрезом фаски f_1 .

**Формулы для расчета профиля стружечной канавки развертки с
прямолинейной спинкой зуба (см. рис. 4 и 5)**

Обозначение	Формулы расчета	Номер формулы
$3(x_3, y_3)$	$x_3 = -R \sin(\tau - \tau_f), \quad y_3 = R \cos(\tau - \tau_f)$	—
$4(x_4, y_4)$	$x_4 = -R \sin(\tau - \tau_f - \tau_T), \quad y_4 = R \cos(\tau - \tau_f - \tau_T)$	—
$5(x_5, y_5)$	$x_5 = -R \sin(\tau_5), \quad y_5 = R \cos(\tau_5)$	—
$\Delta 3 - 4 - 4'$: $\angle 4 = \eta$, $\angle 4' = \varepsilon$, $\angle 3 = \zeta$ T_{HC}	$\eta = \arctg((x_4 - x_3)/(y_4 - y_3)),$ $\zeta = 180 - (\eta + \varepsilon),$ $T_{HC} = f_T \sin \zeta / \sin \varepsilon$	(9)
$\Delta 3 - 5 - 5'$: $3 - 5 = f_{\Delta C}$, $\angle 5 = \eta_C$, $\angle 3 = \zeta_C$, $5 - 5' = \Delta H_C$	$f_{\Delta C} = d \sin(0,5(\tau_5 - \tau + \tau_f)),$ $\eta_C = \arctg((x_5 - x_3)/(y_5 - y_3)),$ $\zeta_C = 180 - (\eta_C + \varepsilon),$ $\Delta H_C = f_{\Delta C} \sin \zeta_C / \sin \varepsilon$	(10)
H_C	$H_C = H + \Delta H_C$	(11)
$3_j(x_{3j}, y_{3j})$	$x_{3j} = -R \sin(\tau_j - \tau_f), \quad y_{3j} = R \cos(\tau_j - \tau_f)$	—
$4_j(x_{4j}, y_{4j})$	$x_{4j} = -R \sin(\tau_j - \tau_f - \tau_T), \quad y_{4j} = R \cos(\tau_j - \tau_f - \tau_T)$	—
$\Delta 3_j - 3 - 3'$: $3_j - 3 = f_{\Delta}$, $\angle 3 = \eta_j$, $\angle 3' = \varepsilon$, $\angle 3_j = \zeta_j$ $3 - 3' = \Delta H$	$f_{\Delta} = d \sin(0,5(\tau_j - \tau)),$ $\eta_j = \arctg((x_5 - x_{3j})/(y_5 - y_{3j})),$ $\zeta_j = 180 - (\eta_j + \varepsilon)$ $\Delta H_j = f_{\Delta} \sin \zeta_j / \sin \varepsilon$	(12)
$\Delta 3_j - 4_j - 4'$: $3_j - 4_j = f_T$, $\angle 4_j = \eta'_j$, $\angle 4' = \varepsilon$, $\angle 3_j = \zeta'_j$ $4 - 4' = T_{Hj}$	$\eta_j] = \arctg((x_{4j} - x_{3j})/(y_{4j} - y_{3j})),$ $\zeta'_j = 180 - (\eta'_j + \varepsilon)$ $T_{Hj} = f_T \sin \zeta'_j / \sin \varepsilon$	(13)
H_j	$H_j = H_C + \Delta H_j$	(14)

П р и м е ч а н и е. Введены следующие обозначения: точка — $3(x_3, y_3)$; отрезок прямой — $3 - 5$; треугольник — $\Delta 3 - 5 - 5'$; угол при вершине треугольника — $3\angle 3$.

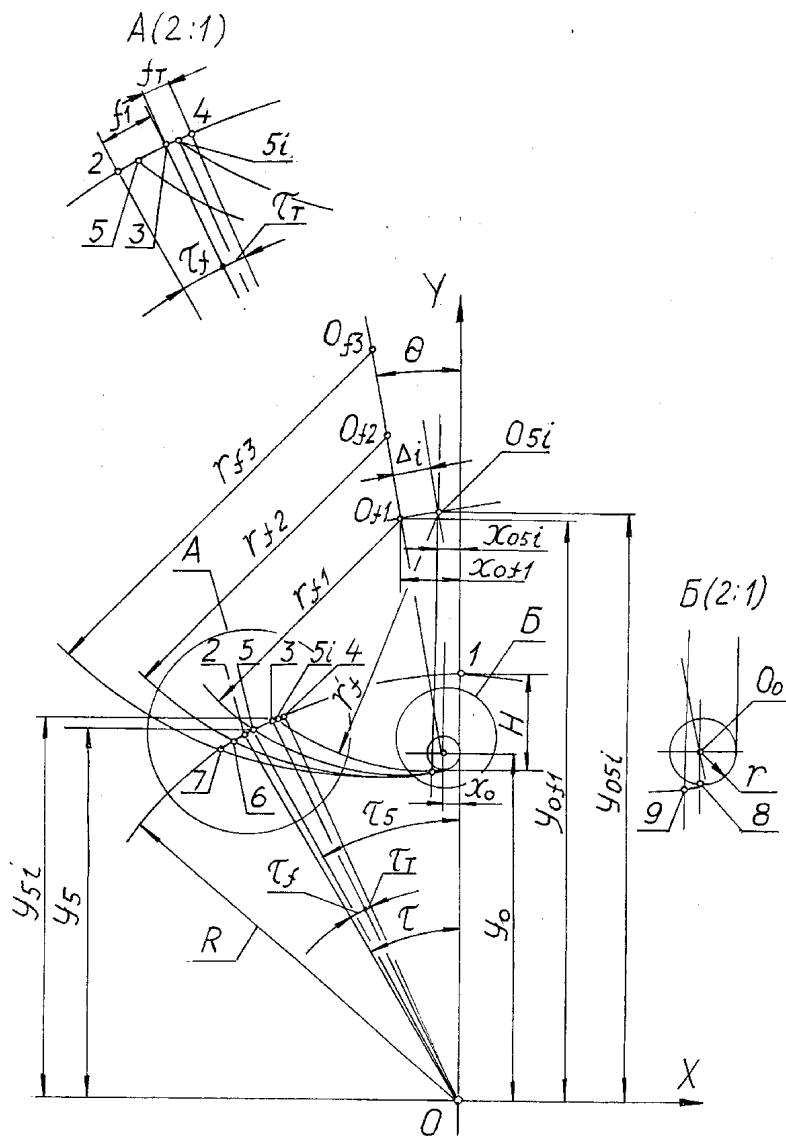


Рис. 6. Определение радиуса профиля канавки r_f при минимальном подрезе зуба и постоянном угловом шаге τ

В точке O_{f1} восстановим перпендикуляр к линии $O_{f1} - O_0$, на котором отложим размер Δ_i из ряда $\Delta = 1, 2, 3, 4$. Определим положение нового центра O_f как пересечение окружности радиуса r_f с центром в точке 5_i с прямой, параллельной линии $O_f - O_0$ и отстоящей от нее на размер Δ_i . Отмечаем на чертеже координаты центра $O_0(x_0, y_0)$, центра $O_{f1}(x_{0f1}, y_{0f1})$ и $O_{5i}(x_{5i}, y_{5i})$, ординаты y_5 и y_{5i} .

Если на первом этапе определяют такой радиус r_{fi} , при котором нет подреза зуба, то второй этап опускают, т.е. принимают $r_{fi} = r_f, \Delta = 0$.

Этап 2. Устранение подрза зуба коррекцией положения центра O_f окружности радиуса r_f на размер Δ при равномерном шаге τ (рис. 7). Повторяем исходную часть чертежа, выполненную на предыдущем этапе. Через точку O_{5i} проведем прямую, параллельную оси Y , и определим центры дуг O_{3c} и O_{4c} , как пересечение вертикальной прямой, проходящей через точку O_{5i} , и дуг радиуса r_f с центром в точках 3 (x_3, y_3) и 4 (x_4, y_4) соответственно (место B). Отметим точку 9_c , которая является самой глубокой точкой стружечной канавки.

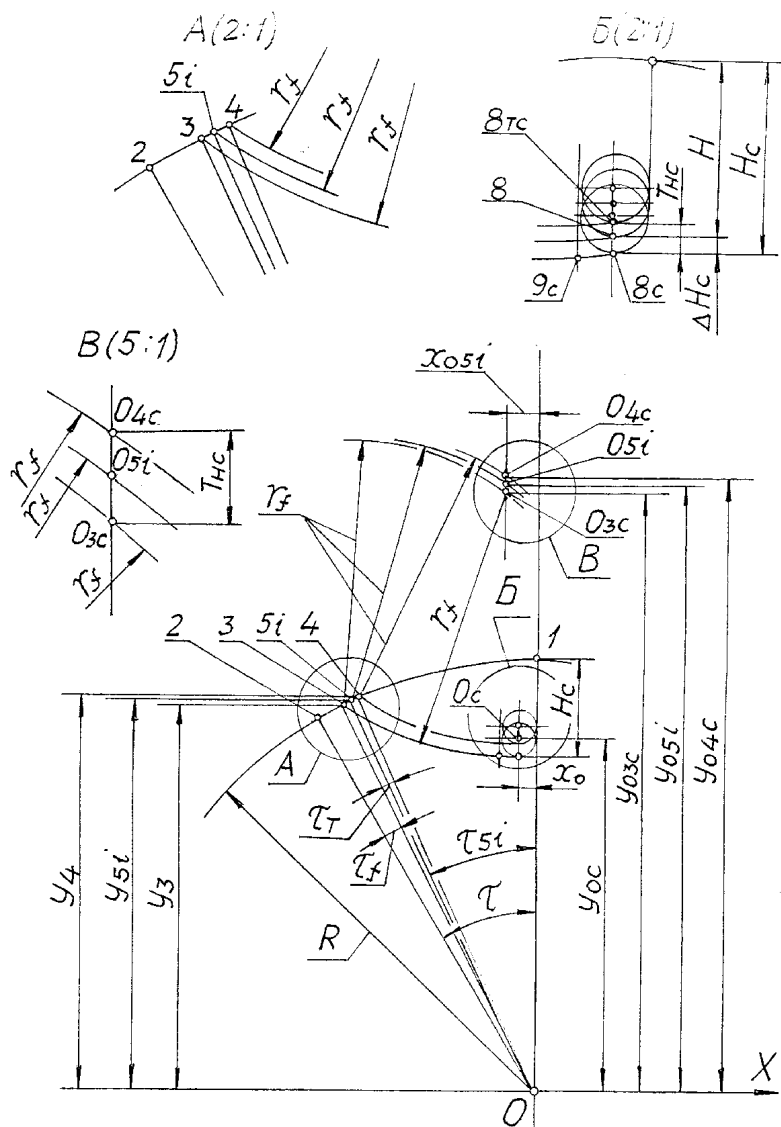


Рис. 7. Устранение подрза зуба коррекцией положения центра O_f окружности радиуса r_f

При коррекции профиля его смещают плоскопараллельным переносом.

Из центра O_{3C} радиусом r_f проведем спинку зуба, скруглим дно канавки радиусом r и отметим высоту зуба H_C (между точками 1 и 9_C). Из центра O_{4C} , радиусом r_f проведем предельное положение спинки зуба и также скруглим дно канавки радиусом r .

Обозначим координаты точек $O_{3C}(x_{03C}, y_{03C})$ и $O_4(x_{04C}, y_{04C})$ и графически определим размер допуска на высоту зуба T_{H_C} (место B). Очевидно, размер T_{H_C} обусловлен допуском на отклонение размера фаски f_T , поэтому допустимые крайние положения спинки зуба ограничены точками 3 и 4 .

Задача второго этапа — итерационная, т.е. для получения удовлетворительного результата может потребоваться перебор последовательно нескольких значений Δ_i из ряда размеров Δ . Если ни при одном из значений Δ точка 5_i не расположилась между точками 3 и 4 , следует увеличить радиус r_f .

В случае, когда при всех значениях r_f и Δ условие положения точки 5_i не выполнено, необходимо изменить параметры зуба развертки или применить специальную фрезу.

Этап 3. *Определение размеров профиля канавки при неравномерном угловом шаге τ_j* (рис. 8). Положение точки 2_j определяется углом τ_j (см. табл. 1), точки 3_j и 4_j — заданы центральными углами τ_f и τ_T , размеры которых не зависят от величины изменения углового шага. Проставляем координаты точек $3_j(x_{3j}, y_{3j})$ и $4_j(x_{4j}, y_{4j})$. Известным способом (этап 2) определяем положение новых центров O_{3j} и O_{4j} . Радиусом r_f проводим дуги, очерчивающие границы возможных положений спинки зуба. Проставляем на чертеже размеры высоты зуба: расчетной — H , постоянной — H_C и при неравномерном шаге — H_j ; отмечаем величину отклонения высоты ΔH_j (место A) и допуски на высоту зуба T_{H_C} и T_{H_j} .

Рассмотрен вариант, при котором $\tau_j > \tau$. При условии $\tau_j < \tau$ задача решается аналогично.

Аналитический расчет параметров стружечной канавки. Объекты расчета: радиус спинки зуба r_f , величина смещения Δ , высота зуба H_C и допуск на высоту зуба T_{H_C} при постоянном угловом шаге, или высота зуба H_j и допуск на высоту зуба T_{H_j} при переменном угловом шаге.

Известны параметры развертки: $d, z, f_1, f_T, H, r, \tau_j, \theta = 10^\circ, \gamma = 0, \omega = 0$.

Этап 1. *Расчетные формулы с (1) по (4) повторяют приведенные для рис. 4.*

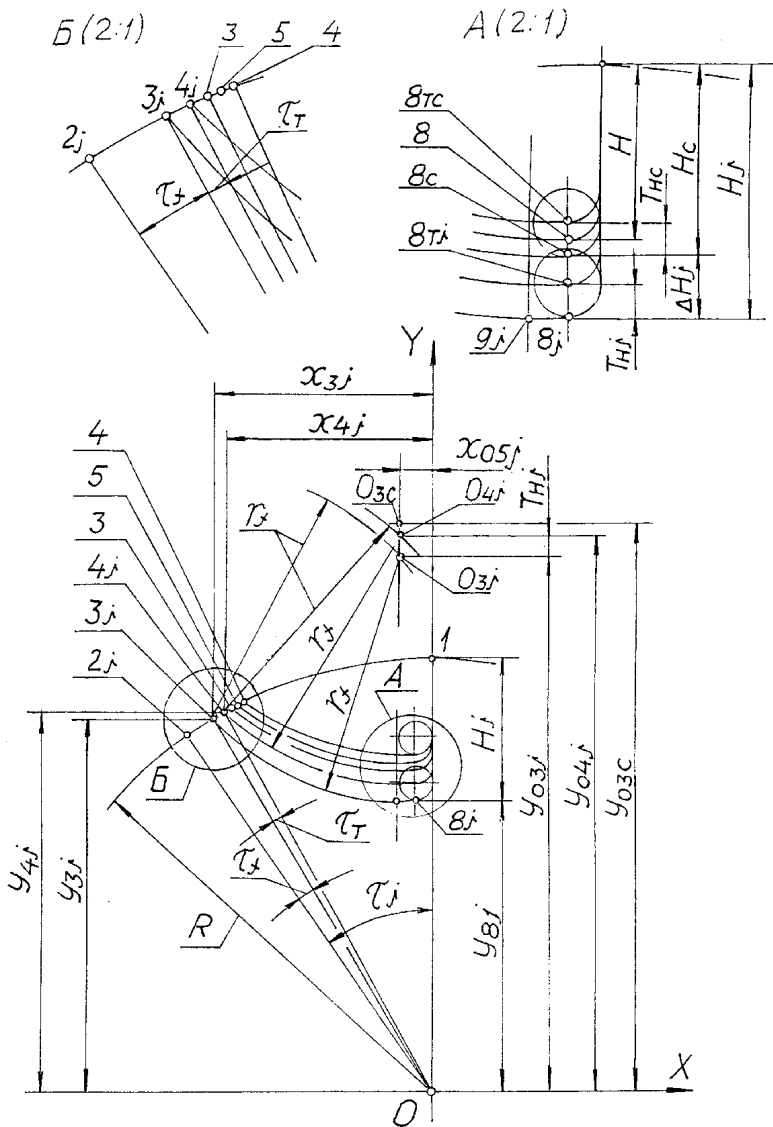


Рис. 8. Определение размеров профиля канавки с криволинейной спинкой зуба при неравномерном угловом шаге τ_j

Координаты центра O_{fi} дуги окружности радиусом спинки зуба r_{fi} (см. рис. 6) определяют из системы уравнений (15):

$$\begin{cases} x_{Ofi} = x_0 - (r_{fi} - r) \sin \vartheta; \\ y_{Ofi} = y_0 + (r_{fi} - r) \cos \vartheta; \end{cases} \quad (15)$$

здесь i — текущее значение радиуса и $O_{fi} = O_{f1}$.

Координату y_5 определяют как точку пересечения двух окружностей (наружного радиуса развертки и дуги, образующей спинку зуба)

при совместном решении их уравнений (см. рис. 6):

$$\begin{cases} x_5^2 + y_5^2 = R^2; \\ (x_5 - x_{Ofi})^2 + (y_5 - y_{Ofi})^2 = r_f^2. \end{cases} \quad (16)$$

Решение системы уравнений (16) дает координату y_5 и угол τ_5 :

$$y_5 = p \mp \sqrt{p^2 - q}, \quad (17)$$

“–” — если $x_{Ofi} < 0$; “+” — если $x_{Ofi} \geq 0$;

$$\tau_5 = \arccos(y_5/R), \quad (18)$$

где $R = 0,5d$; $b = (R^2 - r_f^2 + x_{Ofi}^2 + y_{Ofi}^2)/(2x_{Ofi})$; $c = y_{Ofi}/x_{Ofi}$; $p = bc/(c^2 + 1)$; $q = (b^2 - R^2)/(c^2 + 1)$.

Определим положение точки 5 относительно дуги 3–4

$$\Delta\tau_5 = |\tau_5 - (\tau - \tau_f - 0,5\tau_N)|. \quad (19)$$

Расчет проводят для всех радиусов r_i и выбирают тот радиус, при котором размер $\Delta\tau_{5i}$ минимальный.

Условие положения точки 5 в пределах дуги 3–4:

$$\Delta\tau_5 < 0,5\tau_T. \quad (20)$$

Если условие (20) выполняется, то второй этап по коррекции положения центра окружности радиуса r_f пропускают, переходя сразу к третьему этапу расчета.

Этап 2. *Коррекция положения центра окружности радиуса r_{fi} на величину Δ .* Если точка 5 находится вне участка 3–4 (условие (20) не выполнено), то проводят коррекцию положения центра окружности радиуса r_f на величину Δ таким образом, чтобы добиться пересечения двух окружностей радиусами R и r_f в пределах допустимого участка 3–4. Величину смещения Δ_i выбирают из ряда $\Delta = 0, 1, 2, 3, 4$ мм.

Координаты центра O_{5i} дуги окружности радиуса r_f :

$$\begin{cases} x_{05i} = x_{of} + \Delta_i \cos \vartheta; \\ y_{05i} = y_{of} + \Delta_i \sin \vartheta. \end{cases} \quad (21)$$

Координаты точки 5_i (см. рис. 7) получим при совместном решении уравнений двух окружностей — радиуса R и радиуса r_f , образующей спинку зуба:

$$\begin{cases} (x_{5i} - x_f)^2 + (y_{5i} - y_f)^2 = r_{f1}^2; \\ x_{5i}^2 + y_{5i}^2 = R^2. \end{cases} \quad (22)$$

Решив систему уравнений (22), вычислим координату y_{5i} и угол τ_{5i} :

$$y_{5i} = p_i \mp \sqrt{p_i^2 - q_i}; \quad (23)$$

“–” — если $x_f < 0$; “+” — если $x_f \geq 0$;

$$\tau_{5i} = \arccos(y_{5i}/R), \quad (24)$$

где $R = 0,5d$; $b = (R^2 - r_f^2 + x_f^2 + y_f^2)/(2x_f)$; $c = y_f/x_f$; $p = bc/(c^2 + 1)$; $q = (b^2 - R^2)/(c^2 + 1)$.

Удовлетворительное решение системы уравнений (22) соответствует неравенству (8). Если условие (8) не выполняется, то следует выбрать другое значение Δ_i из представленного ряда Δ . Если условие (8) не выполняется ни при одном из значений Δ_i при всех радиусах r_{fi} , то необходимо изменить исходные данные. Например, для удовлетворительного решения следует увеличить допуск на ширину фаски f_T .

Формулы для определения размеров профиля канавки H_C , T_{H_c} и ΔH_C при постоянном угловом шаге (см. рис. 7) сведены в табл. 4.

Таблица 4

Формулы для расчета профиля стружечной канавки развертки с криволинейной спинкой зуба (см. рис. 6–8)

Обозначение	Формулы расчета	Номер формулы
$3(x_3, y_3)$	$x_3 = -R \sin(\tau - \tau_f), \quad y_3 = R \cos(\tau - \tau_f)$	—
$4(x_4, y_4)$	$x_4 = -R \sin(\tau - \tau_f - \tau_T), \quad y_4 = R \cos(\tau - \tau_f - \tau_T)$	—
$5(x_5, y_5)$	$x_4 = -R \sin(\tau - \tau_f - \tau_T), \quad y_4 = R \cos(\tau - \tau_f - \tau_T)$	—
$O_0(x_0, y_0)$	$x_0 = -r, \quad y_0 = R - H + r$	(4)
$O(x_{0fi}, y_{0fi})$	$x_{0fi} = x_0 - (r_{fi} - r) \sin \vartheta, \quad y_{0fi} = y_0 + (r_{fi} - r) \cos \vartheta$	(15)
$O(x_{05i}, y_{05i})$	$x_{05i} = x_{0fi} + \Delta \cos \vartheta, \quad y_{05i} = y_{0fi} + \Delta \sin \vartheta$	(21)
$5_i(x_{5i}, y_{5i})$	$x_{5i} = R \sin(\tau_{5i}), \quad y_{5i} = R \cos(\tau_{5i})$	
$8(x_8, y_8)$	$x_8 = x_0, \quad y_8 = R - H$	
$9(x_9, y_9)$	$x_9 = x_{05i}, \quad y_9 = y_{05i} - r_f$	
$O(x_{03C}, y_{03C})$	$x_{03C} = x_{05i}, \quad y_{03C} = y_3 + \sqrt{r_f^2 - (x_3 - x_{05i})^2}$	
$O(x_{04C}, y_{04C})$	$x_{04C} = x_{05i}, \quad y_{04C} = y_4 + \sqrt{r_f^2 - (x_4 - x_{05i})^2}$	
$9_C(x_{9C}, y_{9C})$	$x_{9C} = x_9, \quad y_{9C} = y_{03C} - r_f$	
T_{H_c}	$T_{H_c} = y_{04C} - y_{03C}$	—
ΔH_C	$\Delta H_C = y_8 - y_{9C}$	
H_C	$H_C = H + \Delta H_C$	
$8_C(x_{8C}, y_{8C})$	$x_{8C} = x_8, \quad y_{8C} = R - H_C$	

Обозначение	Формулы расчета	Номер формулы
$3_j(x_{3j}, y_{3j})$	$x_{3j} = -R \sin(\tau_j - \tau_f), \quad y_{3j} = R \cos(\tau_j - \tau_f)$	—
$4_j(x_{4j}, y_{4j})$	$x_{4j} = -R \sin(\tau_j - \tau_f - \tau_T), \quad y_{4j} = R \cos(\tau_j - \tau_f - \tau_T)$	—
x_{05j}	$x_{05j} = x_{05i}$	—
$O_{3j}(x_{03j}, y_{03j})$	$x_{03j} = x_{05i}, \quad y_{03j} = y_{3j} + \sqrt{r_f^2 - (x_{3j} - x_{05j})^2}$	—
$O_{4j}(x_{04j}, y_{04j})$	$x_{04j} = x_{05i}, \quad y_{04j} = y_{4j} + \sqrt{r_f^2 - (x_{4j} - x_{05j})^2}$	—
$9_j(x_{9j}, y_{9j})$	$x_{9j} = x_9, \quad y_{9j} = y_{03j} - r_f$	—
T_{Hj}	$T_{Hj} = y_{04j} - y_{03j}$	(25)
ΔH_j	$\Delta h_j = y_{8c} - y_{9j}$	(26)
H_j	$H_h = H_C + \Delta H_j$	(27)

Этап 3. *Определение размеров профиля канавки при неравномерном угловом шаге* (см. рис. 8). Рассчитывают допуск на высоту зубьев T_{Hj} , изменение высот зубьев ΔH_j , высоту зубьев H_j . Последовательность расчета параметров схемы сведена в табл. 4.

Верхнее отклонение высоты зуба $es_{Hj} = 0$. Нижнее отклонение высоты зуба $ei_{Hj} = -T_{Hj}$.

Выводы. Приведенный алгоритм содержит элементы классификации профиля зубьев, формализацию и оптимизацию параметров зуба и служит основой для создания программ автоматизации операции фрезерования канавок и затачивания зубьев разверток. При помощи приведенной методики можно проектировать и рассчитывать стружечные канавки разверток, как с постоянным, так и с переменным угловым шагом зубьев, используя при этом вычислительную технику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В ы с о к о п р о и з в о д и т е л ь н ы е конструкции зенкеров и разверток и их рациональная эксплуатация. Под ред. М.Н. Ларина. – М.: Машгиз, 1960. – 167 с.
2. П а л е й М. М. Технология производства металорежущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1982. – 256 с.
3. М а л е в с к и й Н. П., Д а н и л е н к о Б. Д. Зенкера и зенковки: Учебное пособие. – М.: МВТУ, 1985. – 48 с.
4. М е т а л л о р е ж у щ и е инструменты / Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой и др. // Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1989. – 229 с.
5. С п р а в о ч н и к конструктора-инструментальщика. Под ред. В.И. Баранчикова. – М.: Машиностроение, 1994. – 237 с.
6. С п р а в о ч н и к технолога-машиностроителя. Т2. Под ред. А.М. Дальского. – М.: Машиностроение, 2001. – 944 с.

Статья поступила в редакцию 24.03.2003