

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»

Д.Л. СКУРАТОВ, А.Н. ШВЕЦОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗУБОРЕЗНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов и специальности 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей

САМАРА

Издательство Самарского университета

2023

УДК 621.9.022(075)

ББК К63-56-02я7

С467

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Н. В. Н о с о в,
д-р техн. наук, проф. В. Б. Б а л я к и н

Скуратов, Дмитрий Леонидович

С467 **Проектирование зуборезного инструмента для изготовления цилиндрических колес:** учебное пособие / *Д.Л. Скуратов, А.Н. Швецов.* – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – 128 с.

ISBN 978-5-7883-1967-4

Описано назначение, области применения, типы и принцип работы зуборезных долбяков и червячных модульных фрез.

Подробно изложены методики проектирования зуборезных долбяков и червячных модульных фрез. Приведены справочные данные, необходимые для проведения расчета и назначения необходимых параметров данного инструмента, представлены примеры расчетов и рабочие чертежи спроектированных долбяка и червячной фрезы.

Предназначено для студентов дневного отделения, обучающихся по машиностроительным специальностям. Может быть полезно студентам заочного отделения.

Подготовлено на кафедре технологий производства двигателей.

УДК 621.9.022(075)

ББК К63-56-02я7

ISBN 978-5-7883-1967-4

© Самарский университет, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. ЗУБОРЕЗНЫЕ ДОЛБЯКИ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС.....	6
1.1. Назначение, области применения, типы и принцип работы долбяков.....	6
1.2. Последовательность проектирования прямозубых долбяков для нарезания зубчатых колес наружного зацепления.....	17
2. ЧЕРВЯЧНЫЕ МОДУЛЬНЫЕ ФРЕЗЫ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС.....	43
2.1. Назначение, области применения, типы и принцип работы червячных фрез.....	43
2.2. Последовательность проектирования червячных цельных мо- дульных фрез для нарезания цилиндрических зубчатых колес наружного зацепления.....	60
Заключение.....	124
Библиографический список.....	126

ВВЕДЕНИЕ

Зубчатые колеса – это детали машин, широко используемые при производстве редукторов современных авиадвигателей и их агрегатов, редукторов вертолетов, судовых двигателей и двигателей автомобилей, редукторов общего назначения, трансмиссий и т.д. Они обеспечивают постоянство передаточного отношения, обладают высоким КПД, надежностью, долговечностью при малых габаритах. К недостаткам зубчатых передач следует отнести высокие требования к точности изготовления, а также наличие шума при работе на значительных скоростях, который в основном обусловлен погрешностями шага зубчатых колес, профиля зубьев, а также переменной жесткостью зацепления и подшипниковых опор валов [1].

Нарезание зубчатых колес может осуществляться методами копирования и обкатки, принципиально отличающимися друг от друга.

При методе копирования формируемый профиль впадин между зубьями является точной копией профиля режущих кромок зубообразующего инструмента. К основным режущим инструментам, работающим по методу копирования, относятся: дисковые и пальцевые модульные фрезы, круговые протяжки и зубодолбежные головки [9].

В отличие от метода копирования при методе обкатки воспроизводится имитация зацепления зубчатой передачи, а именно: двух зубчатых колес, червяка и червячного колеса или зубчатого колеса и рейки. При этом один из элементов зубчатой пары является заготовкой, а другой, путем соответствующей заточки зубьев, трансформирован в зуборезный инструмент. К основным преимуществам метода обкатки по сравнению с методом копирования

следует отнести то, что он позволяет, во-первых, одним режущим инструментом нарезать с высокой точностью зубчатые колеса с разным числом зубьев, но одного модуля, а, во-вторых, обеспечивает более высокую производительность процесса. Нарезание зубчатых колес по методу обкатки осуществляется на специальных зуборезных станках червячными модульными фрезами, зуборезными долбяками и гребенками, зубострогальными резцами, зуборезными головками и т.д. [9].

В предлагаемой первой части учебного пособия изложены методики проектирования зуборезных долбяков и червячных модульных фрез, работающих, как уже отмечалось, по методу обкатки. Пособие будет полезно при подготовке бакалавров, магистров и специалистов соответственно по машиностроительным направлениям и специальностям, сфера деятельности которых связана с механической обработкой материалов и проектированием зуборезного инструмента.

1. ЗУБОРЕЗНЫЕ ДОЛБЯКИ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

1.1. НАЗНАЧЕНИЕ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ, ТИПЫ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ДОЛБЯКОВ

Зуборезный долбяк представляет собой режущий инструмент, выполненный в виде корригированного зубчатого колеса, снабженного передними и задними углами на вершине и боковых сторонах зубьев, т.е. колеса, состоящего из большой совокупности зубчатых колес с бесконечно малой шириной венца, имеющих положительную, нулевую и отрицательную коррекцию, установленных на одной оси.

Долбяки предназначены для нарезания прямозубых и косозубых цилиндрических зубчатых колес с наружным и внутренним зацеплением, блоков зубчатых колес, а также для нарезания шевронных колес. Косозубые зубчатые колеса обеспечивают по сравнению с прямозубыми передачу большей мощности при тех же размерах колес и повышают плавность передачи. Вместе с тем их использование приводит к появлению дополнительной осевой силы. В мощных редукторах применяют шевронные зубчатые колеса, не передающие на подшипники осевые нагрузки [1].

Нарезание зубчатых колес при зубодолблении основано на имитации зацепления двух цилиндрических колес, одно из которых является режущим инструментом (долбяком), а второе (нарезаемое) – заготовкой. Долбяк устанавливается и закрепляется посредством гайки на штосселе зубодолбежного станка, который вместе с долбяком совершает возвратно-поступательное движение I. Схема зубодолб-

ления со всеми необходимыми движениями инструмента и заготовки приведена на рис. 1.1. В условиях нарезания прямозубчатых колес это движение является прямолинейным, а при нарезании косозубых – винтовым. Следует отметить, что главное движение или движение резания совершается при перемещении долбяка вниз, а холостой ход при его движении вверх. При этом происходит поворот долбяка (движение II) относительно заготовки, т.е. выполняется обкаточное движение.

Скорость главного движения резания при зубодолблении рассчитывается по формуле

$$v = \frac{2 \cdot l \cdot n}{1000},$$

где l – длина хода долбяка, мм (складывается из длины зуба нарезаемого колеса и величин недобега и перебега; величины недобега и перебега в сумме составляют 5...7 мм); n – число двойных ходов долбяка в минуту.

Окружная скорость вращения долбяка задается величиной круговой подачи $S_{кр}$, которая в свою очередь определяет толщину слоя материала, срезаемого боковыми режущими кромками зубьев. Толщина среза выражается длиной дуги делительной окружности долбяка, на которую он поворачивается за один его двойной ход (мм/дв.ход). Величина круговой подачи зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, модуля нареза-

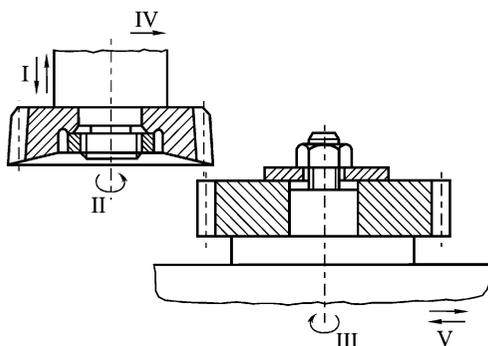


Рис. 1.1. Схема нарезания зубчатого колеса долбяком

емого колеса, его степени точности, шероховатости поверхности и т.д. Обычно она составляет $0,1 \dots 0,5$ мм/дв.ход.

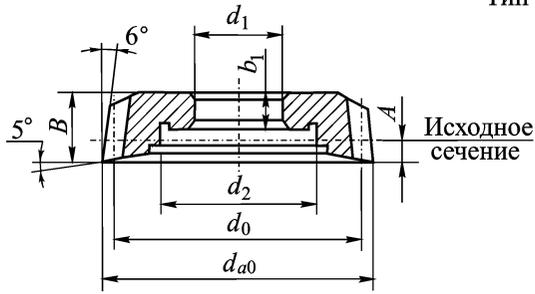
В процессе нарезания колеса заготовка, закрепленная на столе зубодолбежного станка, совершает непрерывное вращательное движение III, строго согласованное с вращением долбяка, которое обеспечивается посредством цепи деления станка, т.е. за время поворота долбяка на один зуб заготовка также поворачивается на один зуб.

Помимо указанных ранее движений зуборезный долбяк совершает движение радиальной подачи IV, которое позволяет осуществить врезание долбяка в обрабатываемую заготовку. Для исключения трения задней поверхности зуба долбяка о заготовку при холостом ходе либо долбяк отводится от заготовки, например, за счет качания суппорта станка, либо стол станка от долбяка. При движении резания долбяк и стол занимают исходное положение. На рис. 1.1 эти перемещения обозначены как движение V.

Процесс зубодолбления обеспечивает практически такую же точность, как и процесс зубофрезерования, однако существенно уступает ему по производительности, что обусловлено наличием холостого хода у режущего инструмента. Поэтому нарезание зубчатых колес посредством метода зубодолбления целесообразно осуществлять в тех случаях, когда нельзя использовать процесс зубофрезерования, например, при нарезании блоков зубчатых колес, зубчатых колес с внутренним зацеплением, а также шевронных колес.

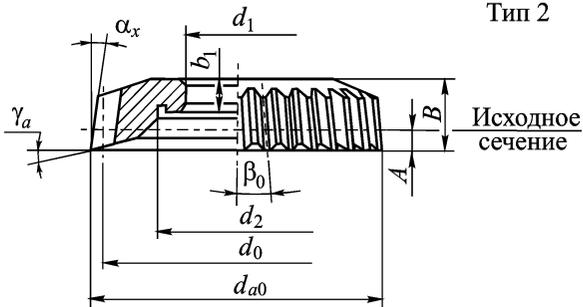
Для нарезания зубчатых колес и блоков зубчатых колес применяют различные типы долбяков. По способу крепления на штосселе станка зуборезные долбяки делятся на насадные, представленные на рис. 1.2, и хвостовые, приведенные на рис. 1.3. В свою очередь насадные зуборезные долбяки по конструктивному исполнению подразделяются на дисковые (см. рис. 1.2, а, б) и чашечные (см. рис. 1.2, в).

Тип 1



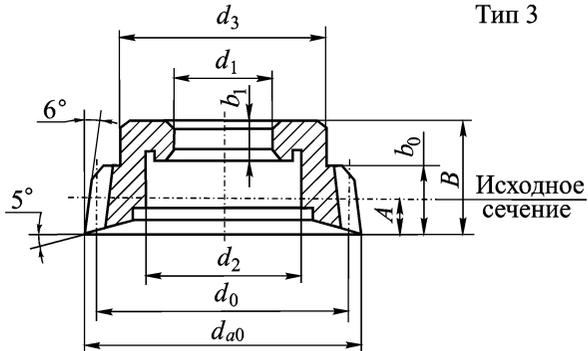
a

Тип 2



б

Тип 3



в

Рис. 1.2. Зуборезные долбки:

a – дисковый прямозубый; *б* – дисковый косозубый; *в* – чашечный прямозубый

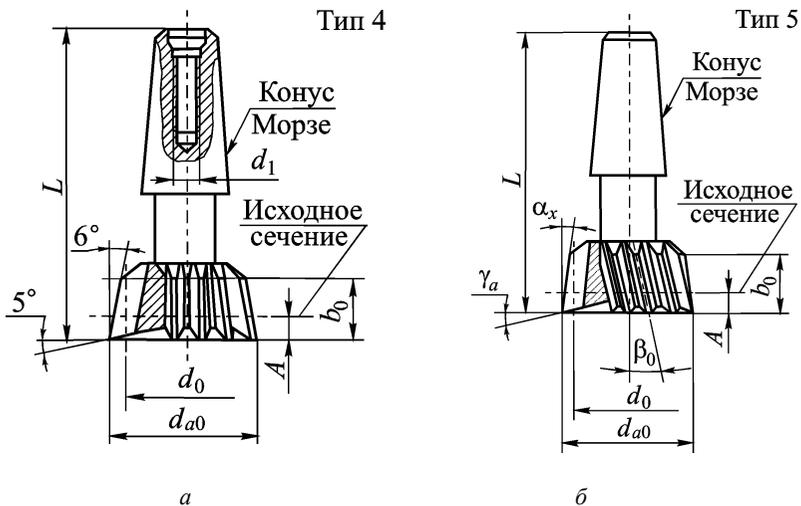


Рис. 1.3. Хвостовые долбяки:
 а – прямозубый; б – косозубый

Насадные зуборезные долбяки применяются для нарезания прямозубых и косозубых цилиндрических зубчатых колес наружного зацепления. При этом для нарезания прямозубых зубчатых колес используются прямозубые долбяки, а для нарезания косозубых и шевронных зубчатых колес применяются косозубые долбяки.

Как видно из рис. 1.2, конструктивное отличие дисковых долбяков от чашечных заключается в том, что у последних элементы крепления располагаются в специальном углублении, которое исключает возможность контакта этих элементов с упором, имеющим место, например, при изготовлении блока зубчатых колес.

Хвостовые зуборезные долбяки имеют небольшой диаметр и используются преимущественно для нарезания мелко модульных зубчатых колес ($m < 1$) и колес с внутренним зацеплением.

В соответствии с ГОСТ 9323-79 [14] зуборезные долбяки изготавливают следующих пяти типов, приведенных на рис. 1.2 и 1.3:

- тип 1 – дисковые прямозубые долбяки классов точности АА, А и В с номинальными величинами делительных диаметров 80, 100, 125, 160 и 200 мм;

- тип 2 – дисковые косозубые долбяки классов точности А и В с номинальными величинами углов наклона режущих зубьев 15° и 23° и номинальным делительным диаметром 100 мм;

- тип 3 – чашечные прямозубые долбяки классов точности АА, А и В с номинальными величинами делительных диаметров 80, 100 и 125 мм и классов точности А, В с номинальным делительным диаметром 50 мм;

- тип 4 – хвостовые прямозубые долбяки классов точности А и В с номинальными величинами делительных диаметров 25 и 38 мм;

- тип 5 – хвостовые косозубые долбяки класса точности В с номинальными углами наклона 15° и 23° и номинальным диаметром 38 мм.

Долбяки класса точности АА применяются для изготовления зубчатых колес 6-й степени точности, а классов точности А и В – соответственно для 7-й и 8-11-й степеней точности [11].

Рекомендуемые геометрические параметры основных конструктивных элементов некоторых чистовых долбяков приведены в табл. 1.1-1.5.

Как уже отмечалось ранее, процесс нарезания зубчатых венцов у цилиндрических колес зуборезными долбяками, как правило, менее производителем по сравнению с процессом зубонарезания червячными модульными фрезами из-за наличия холостого хода у первого из упомянутых процессов. Однако при обработке зубчатых секторов, колес с узким ободом и большим числом зубьев процесс зубодолбления обеспечивает большую производительность по сравнению с зубофрезерованием [11], что необходимо учитывать при проектировании технологических процессов.

Таблица 1.1. Основные геометрические размеры некоторых дисковых прямозубых
долбяков (ГОСТ 9323-79)

m_0 , мм	z_0	d_1 , мм	d_2 , мм	x_0^*	A , мм	b_1 , мм	B , мм
Номинальный делительный диаметр $d_0 = 100$ мм							
1,000	100	44,45	70	0,90	8,6	8	17
1,125	90			0,80	8,6		
1,250	80			0,70	8,3		
1,375	73			0,63	8,2		
1,500	68			0,58	8,3		
1,750	58			0,48	8,0		
2,000	50			0,40	7,6		
2,250	45			0,35	7,5		
2,500	40			0,30	7,1	10	20
2,750	36			0,26	6,8		
3,000	34			0,24	6,8		
3,250	31			0,21	6,5		
3,500	28			0,18	6,0		
3,750	27			0,17	6,1		
4,000	25			0,15	5,7		
4,250	24			0,14	5,7		
4,500	22			0,12	4,8		
5,000	20			0,10	4,3		
5,500	18			0,08	4,2	12	22
6,000	17			0,07	4,0		
6,500	16	0,06	3,7				
7,000	16	0,06	4,0				
8,000	14	0,04	3,0				
Номинальный делительный диаметр $d_0 = 125$ мм							
2,00	62	44,45	80	0,52	9,9	10	22
2,25	56			0,46	9,8		
2,50	50			0,40	9,5		
2,75	46			0,36	9,4		
3,00	42			0,32	9,1		
3,25	38			0,28	8,7		
3,50	36			0,26	8,7		
3,75	34			0,24	8,6		
4,00	31			0,21	8,0	14	24
4,50	28			0,18	7,7		
5,00	25			0,15	7,1		
5,50	23			0,13	6,8		
6,00	21			0,11	6,3	14	28
6,50	19			0,09	5,6		

Окончание табл. 1.1

m_0 , мм	z_0	d_1 , мм	d_2 , мм	x_0^*	A , мм	b_1 , мм	B , мм
7,00	18	44,45	80	0,08	5,3	14	28
8,00	16			0,06	4,6		
9,00	14			0,04	3,4		
10,00	14			0,04	3,8		

Примечание. По согласованию с потребителем допускается изготавливать долбяки номинальным делительным диаметром 100 мм с диаметром посадочного отверстия 31,75 мм вместо 44,45, долбяки номинальным диаметром 125 мм с диаметром посадочного отверстия 44,443 мм вместо 44,45 мм.

Таблица 1.2. Основные геометрические размеры дисковых косозубых долбяков с номинальным делительным диаметром $d_0 = 100$ мм (ГОСТ 9323-79)

m_0 , мм	z_0	x_0^*	A , мм	z_0	x_0^*	A , мм	b_1 , мм	B , мм
1,000	100	1,00	9,18	94	0,94	8,23	8	17
1,125	88	0,88	9,10	82	0,82	8,10		
1,250	80	0,80	9,18	76	0,76	8,30		
1,375	70	0,70	8,86	67	0,67	8,09		
1,500	66	0,66	9,10	62	0,62	8,15		
1,750	56	0,56	9,01	53	0,53	8,14		
2,000	50	0,50	9,18	47	0,47	8,23	10	20
2,250	44	0,44	9,10	41	0,41	8,10		
2,500	40	0,40	9,18	37	0,35	8,12		
2,750	36	0,36	9,10	34	0,34	8,19		
3,000	32	0,32	8,84	32	0,32	8,37		
3,250	30	0,30	8,97	28	0,28	8,01		
3,500	28	0,28	9,01	27	0,27	8,26		
3,750	26	0,26	8,97	25	0,25	8,21		
4,000	25	0,25	9,18	23	0,23	8,08		
4,250	23	0,23	8,99	22	0,22	8,19		
4,500	22	0,22	9,10	21	0,21	8,26		
5,000	20	0,20	9,18	19	0,19	8,30		
5,500	18	0,18	9,10	17	0,17	8,19		
6,000	16	0,16	8,84	16	0,16	8,37		
6,500	15	0,15	8,97	14	0,15	8,01		
7,000	14	0,14	9,01	13	0,14	8,01		

Примечание. При номинальном угле наклона зубьев $\beta_0 = 15^\circ$ угол на вершине зуба в осевом сечении $\alpha_x = 6^\circ 12'$; при $\beta_0 = 23^\circ$ $\alpha_x = 6^\circ 30'$.

Таблица 1.3. Основные геометрические размеры некоторых чашечных
прямоугольных долбяков (ГОСТ 9323-79)

m_0 , мм	z_0	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	x_0^*	A , мм	b_1 , мм	b_0 , мм	B , мм			
Номинальный делительный диаметр $d_0 = 80$ мм												
1,000	76	31,75	50	64	0,66	6,3	8	12	28			
1,125	67				0,57	6,1						
1,250	60				0,50	5,9						
1,375	56				0,46	6,0						
1,500	50				0,40	5,7						
1,750	43				0,33	5,5						
2,000	38			60	10	0,28	5,3	10	15	30		
2,250	34					0,24	5,1					
2,500	30					0,20	4,8					
2,750	28					0,18	4,7					
3,000	25					60	10		0,15		4,3	17
3,250	24								0,14		4,3	
3,500	22								0,12		4,0	
Номинальный делительный диаметр $d_0 = 100$ мм												
1,000	100	44,45	63	80	0,90	8,6	10	17	30			
1,125	90				0,80	8,6						
1,250	80				0,70	8,3						
1,375	73				0,63	8,2						
1,500	68				0,58	8,3						
1,750	58				0,48	8,0						
2,000	50				0,40	7,6						
2,250	45				0,35	7,5						
2,500	40				0,30	7,1						
2,750	36				0,26	6,8						
3,000	34				0,24	6,8						
3,250	31				0,21	6,5						
3,500	28			0,18	6,0							
3,750	27			0,17	6,1							
4,000	25			0,15	5,7							
4,250	24			0,14	5,7							
4,500	22			78	12	0,12	5,1	12	20	32		
5,000	20					0,10	4,8					
5,500	18					0,08	4,2					
6,000	17					0,07	4,0					
6,500	16					0,06	3,7					

Таблица 1.4. Основные геометрические размеры хвостовых прямозубых долбяков
(ГОСТ 9323-79)

m_0 , мм	z_0	x_0^*	A , мм	b_0 , мм	L , мм	Конус Морзе	d_1
Номинальный делительный диаметр $d_0 = 25$ мм							
1,000	26	0,15	1,40	10	80	B18	M10
1,125	23	0,13	1,40				
1,250	20	0,10	1,20				
1,375	18	0,08	1,00				
1,500	18	0,08	1,10				
1,750	14	0,04	0,67	12			
2,000	12	0,02	0,38				
2,250	12	0,02	0,40				
2,500	10	0,00	0,00	15			
2,750	10	0,00	0,00				
3,000	9	-0,01	-0,29				
Номинальный делительный диаметр $d_0 = 38$ мм							
1,000	38	0,28	2,66	12	100	B24	M12
1,125	34	0,24	2,60				
1,250	30	0,20	2,40				
1,375	28	0,18	2,40				
1,500	25	0,15	2,10				
1,750	22	0,12	2,00	15			
2,000	19	0,09	1,70				
2,250	16	0,06	1,30				
2,500	15	0,05	1,20				
2,750	14	0,04	1,00				
3,000	12	0,02	0,60				
3,250	12	0,02	0,60				
3,500	11	0,01	0,33				
3,750	10	0,00	0,00	17			
4,000	10	0,00	0,00				

Таблица 1.5. Основные геометрические размеры хвостовых косозубых долбяков с номинальным делительным диаметром $d_0 = 38$ мм (ГОСТ 9323-79)

m_0 , мм	z_0	x_0^*	A , мм	z_0	x_0^*	A , мм	b_0 , мм	L , мм
1,000	36	0,1	0,92	35	0,1	0,88	12	100
1,125	32		1,04	31		0,99		
1,250	30		1,15	28		1,09		
1,375	27		1,26	25		1,21		
1,500	24		1,38	23		1,32		
1,750	21		1,61	20		1,53		
2,000	18		1,84	18		1,74	15	
2,250	16		2,07	16		1,96		
2,500	15		2,29	14		2,19		
2,750	13		2,53	13		2,40		
3,000	12		2,76	12		2,61		
3,250	11		2,99	11		2,84		
3,500	10		3,23	10		3,07	17	
3,750	10		3,44	9		3,31		
4,000	9		3,68	9		3,48		

Примечание. При номинальном угле наклона зубьев $\beta_0 = 15^\circ$ угол на вершине зуба в осевом сечении $\alpha_x = 6^\circ 12'$; при $\beta_0 = 23^\circ$ $\alpha_x = 6^\circ 30'$.

Процесс проектирования долбяка предполагает наличие исходных данных, к которым относятся:

- материалы изготавливаемого колеса и (или) шестерни;
- нормальный модуль зубьев m_n , мм;
- угол профиля зуба исходного контура в нормальном сечении α , град.;
- коэффициент высоты головки зуба h_a^* ;
- коэффициент радиального зазора нормального исходного контура c^* ;
- угол наклона линии зуба β , град.;
- степень точности нарезаемого зубчатого колеса (шестерни) и норма бокового зазора между нерабочими профилями зубьев;

- числа зубьев нарезаемой шестерни (z_1) и колеса (z_2);
- коэффициенты смещения исходного контура нарезаемой шестерни (x_1^*) и колеса (x_2^*).

Расчетные зависимости для определения основных параметров зубчатых колес приведены в работе [2].

1.2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРЯМОЗУБЫХ ДОЛБЯКОВ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НАРУЖНЕГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Выполним проектирование прямозубого долбяка, предназначенного для нарезания зубчатого колеса, чертеж которого приведен на рис. 1.4. Исходными данными для расчета являются: $m_n = 2$ мм; $\alpha = 20^\circ$; $h_a^* = 1$; $c^* = 0,25$; $\beta = 0^\circ$; $z_1 = 33$; $z_2 = 66$; $x_1^* = 0$; $x_2^* = 0$.

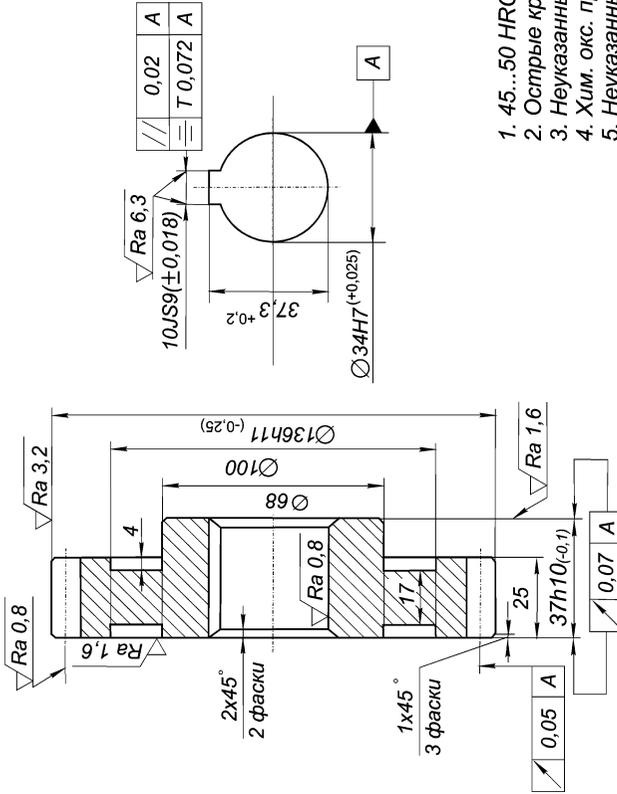
Проектирование выполняется в последовательности, изложенной далее по тексту [11].

1. Исходя из рабочего чертежа изготавливаемого зубчатого колеса, выбирается конструкция зуборезного долбяка, марка инструментального материала и степень точности долбяка.

Для обработки зубчатого колеса, представленного на рис. 1.4, учитывая рекомендации, приведенные в 1.1, выбираем дисковый прямозубый долбяк.

Долбяки, согласно данным работы [3], изготавливаются из быстрорежущих сталей таких марок как P9, P18, P6M5 и др., а также с целью повышения стойкости и производительности из твердых сплавов T5K10, T15K6 и т.д. Так как нарезание зубчатого венца осуществляется у заготовки, выполненной из стали 40X, твердость которой после нормализации составляет 174...217 НВ ($\sigma_b = 590$ МПа), то для изготовления зуборезного долбяка выбираем быстрорежущую сталь P6M5 ГОСТ 19265-73 [17].

▽ Ra 1,25



Модуль нормальный	m_n	2
Число зубьев	z	66
Исходный контур		ГОСТ 13755-68
Коэффициент смещения	x	0
Степень точности по ГОСТ 1643-81		7-B
Допуск на радиальное биения зубчатого венца	F_r	0,05
Делительный диаметр	d_e	132

1. 45...50 HRC.
2. Острые кромки притупить.
3. Неуказанные радиусы $R = 2$ мм.
4. Хим. окс. прм.
5. Неуказанные предельные отклонения размеров: отверстий по H14, валов по h14, остальных \pm IT14/2.

Рис. 1.4. Изготавливаемое зубчатое колесо

Как видно из чертежа зубчатого колеса, степень точности и вид сопряжения соответствуют 7-В. Для получения данной точности необходимо вначале нарезать зубчатый венец заготовки, обеспечив 8 степень точности, а затем выполнить его шлифование после термообработки. Поэтому для нарезания зубчатого колеса следует использовать долбяк класса точности В.

2. Определяется число зубьев долбяка z_0 на основании выбранного по табл. 1.1 номинального делительного диаметра долбяка. Следует отметить, что при выборе указанного диаметра долбяка следует воспользоваться техническими характеристиками станка, назначенного технологом для обработки заготовки.

Технические характеристики некоторых зубодолбежных станков приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6. Технические характеристики некоторых зубодолбежных станков

Станок	Наибольшие параметры колеса		Межосевое расстояние долбяк-колесо	Диаметр посадочного отверстия долбяка	Наибольший делительный диаметр долбяка
	модуль	наружный диаметр			
5B12	4	200	0...150	31,75	80
5122	5	200	0...210	44,45	100
5A122	5,6	250	0...260	44,45	100
514; 5M14	6	500	0...350	44,45	80
5140	8	500	0...355	44,45	100

Число зубьев долбяка определяется по формуле

$$z_0 = \frac{d_{0\text{ном}}}{m_0},$$

где $d_{0\text{ном}}$ – номинальный делительный диаметр долбяка, мм; m_0 – модуль долбяка, мм; $m_0 = m_n$.

Полученное значение числа зубьев долбяка округляется до ближайшего целого, приведенного в табл. 1.1-1.5.

Если предположить, что обработка колеса, представленного на рис. 1.4, будет выполняться на зубодолбежном полуавтомате 5122 (см. табл. 1.6), то тогда

$$z_0 = \frac{d_{0\text{ном}}}{m_0} = \frac{100}{2} = 50.$$

Долбяк с полученным числом зубьев имеется в табл. 1.1, поэтому какого-либо округления не требуется.

3. Определяется действительный диаметр делительной окружности долбяка

$$d_0 = m_0 z_0 = 2 \cdot 50 = 100 \text{ мм}.$$

4. Назначается передний угол $\gamma_{\text{в}}$ долбяка (рис. 1.5, а). Как показывает практика проектирования зуборезного инструмента у долбяков, предназначенных для черновой обработки, $\gamma_{\text{в}} = 10 \dots 15^\circ$, а у долбяков, предназначенных для чистовой обработки, $\gamma_{\text{в}} = 5^\circ$.

Долбяк, предназначенный для обработки представленного ранее зубчатого колеса, относится к черновым. Поэтому величину переднего угла примем равной $\gamma_{\text{в}} = 10^\circ$.

5. Назначается величина заднего угла долбяка на вершине зубьев $\alpha_{\text{в}}$ (см. рис. 1.5, а). В работах [11, 14] величину данного угла рекомендуется принимать равной 6° . Вместе с тем следует отметить, что увеличение заднего угла на вершине зубьев до величин равных $9 \dots 12^\circ$ может привести к повышению периода стойкости в 1,3...1,5 раза.

Для проектируемого долбяка примем угол $\alpha_{\text{в}}$ равным 6° .

6. Определяется фактический угол профиля долбяка α_0 . При этом точность данного углового размера должна быть не менее $1''$.

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg} \alpha_B \operatorname{tg} \gamma_B} = \frac{\operatorname{tg} 20^\circ}{1 - \operatorname{tg} 6^\circ \operatorname{tg} 10^\circ} = 0,37084,$$

$$\alpha_0 = \operatorname{arctg} 0,37084 = 20^\circ 20' 49''.$$

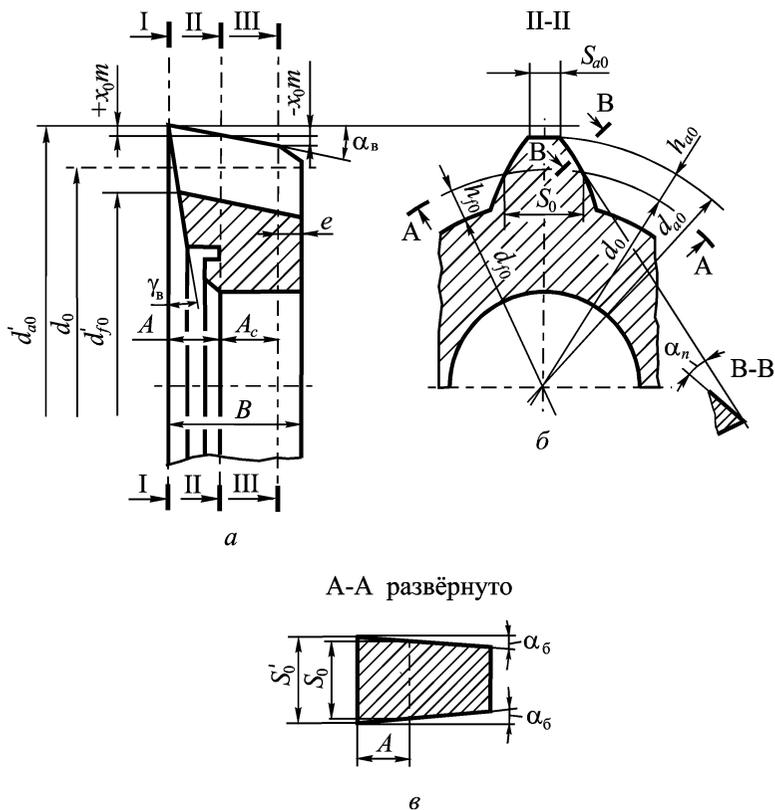


Рис. 1.5. Геометрические параметры долбяка:
 а – в осевом сечении; б – в расчётном сечении;
 в – в сечении по делительному цилиндру

7. Рассчитываются:

- задний угол на боковых сторонах зуба долбяка в сечении нормальном к профилю зуба (рис. 1.5, б)

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\alpha_n &= \sin\alpha_0 \operatorname{tg}\alpha_b = \sin 20^\circ 20' 49'' \cdot \operatorname{tg} 6^\circ = 0,03655, \\ \alpha_n &= \operatorname{arctg} 0,03655 = 2^\circ 05' 35''. \end{aligned}$$

При шлифовании долбяка на этапе его изготовления на угол α_n поворачивается шлифовальная бабка с абразивным инструментом, поэтому данный угол в обязательном порядке указывается как на чертеже долбяка, так и на операционном эскизе при шлифовании его боковой поверхности;

- боковой задний угол в сечении по делительному цилиндру (рис. 1.5, в)

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\alpha_6 &= \operatorname{tg}\alpha_0 \operatorname{tg}\alpha_b = \operatorname{tg} 20^\circ 20' 49'' \cdot \operatorname{tg} 6^\circ = 0,03898; \\ \alpha_6 &= \operatorname{arctg} 0,03898 = 2^\circ 13' 56''. \end{aligned}$$

Для величин углов γ_b , α_b и α , рекомендуемых для назначения при проектировании долбяков, значения углов α_0 , α_n , α_6 приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.7. Значения углов α_0 , α_n , α_6 в зависимости от величин углов γ_b и α_b при $\alpha = 20^\circ$ [11]

γ_b	α_b	α_0	α_n	α_6
5°	6°	20°10'14"	2°04'32"	2°12'40"
5°	9°	20°15'30"	3°08'20"	3°20'44"
10°	6°	20°20'49"	2°05'35"	2°13'58"
10°	9°	20°31'38"	3°10'44"	3°23'38"
15°	9°	20°48'43"	3°13'15"	3°26'42"
17°	9°	20°55'53"	3°14'19"	3°28'04"
17°	12°	21°16'09"	4°24'33"	4°43'48"

8. Определяется основной диаметр зуборезного долбяка

$$d_{b0} = d_0 \cos \alpha_0 = 100 \cdot \cos 20^\circ 20' 49'' = 93,760 \text{ мм.}$$

Расчет геометрических параметров зубьев долбяка в исходном сечении.

9. Расчет толщины зуба долбяка по делительной окружности выполняется по следующим формулам:

- для долбяков, предназначенных для чистовой обработки

$$S_0 = \frac{\pi m}{2} + \Delta S_y ;$$

- для долбяков, предназначенных для черновой обработки

$$S_0 = \frac{\pi m}{2} - \Delta S_{\Pi} + \Delta S_y ,$$

где ΔS_{Π} – утонение зубьев долбяка для создания припуска на боковых поверхностях зубьев нарезаемого колеса для операции последующей обработки, мм:

- для операций чистового зубодолбления или зубофрезерования

$$\Delta S_{\Pi} = \sqrt[3]{m} \cdot \operatorname{tg} \alpha ;$$

- для операций зубошлифования

$$\Delta S_{\Pi} = 0,5 \cdot \sqrt[3]{m} \cdot \operatorname{tg} \alpha ;$$

- для операций шевингования

$$\Delta S_{\Pi} = 0,035m ;$$

ΔS_y – величина утолщения зубьев зуборезного долбяка, используемого при чистовой обработке, необходимая для обеспечения тре-

буемой величины бокового зазора (вида сопряжения) между неработающими профилями зубьев колес в зацеплении, мм. Значения ΔS_y и допуска на толщину зуба долбяка δ_s приведены в табл. 1.8.

Таблица 1.8. Величина утолщения зуба ΔS_y и допуск на толщину зуба δ_s в зависимости от класса точности зуборезного долбяка [11, 12]

m_0 , мм	ΔS_y , мм	δ_s , мм		m_0 , мм	ΔS_y , мм	δ_s , мм	
		Класс А	Класс В			Класс А	Класс В
1,0	0,08	0,02	0,03	4,0	0,10	0,02	0,03
1,25	0,09			4,25			
1,75				4,5	0,11	0,03	0,04
2,0				5,0			
2,25				5,5			
2,5				6,0	0,12		
2,75				6,5			
3,0	0,10			7,0	0,13		
3,25				8,0			
3,5				9,0	0,14		
3,75		10,0	0,15	0,04	0,05		

Для проектируемого черногого долбяка класса точности В

$$\Delta S_{\Pi} = 0,5 \cdot \sqrt[3]{m} \cdot \operatorname{tg} \alpha = 0,5 \cdot \sqrt[3]{2} \cdot \operatorname{tg} 20^\circ = 0,229 \text{ мм.}$$

$$S_0 = \frac{\pi m}{2} - \Delta S_{\Pi} + \Delta S_y = \frac{3,1416 \cdot 2}{2} - 0,229 + 0,09 = 3,003 \text{ мм.}$$

10. Определяются высота головки и ножки долбяка. Для расчета данных параметров используются следующие зависимости:

- высота головки зуба долбяка

$$h_{a0} = h_{f1,2} = 1,25m = 1,25 \cdot 2 = 2,5 \text{ мм,}$$

где $h_{f1,2}$ – высота ножки нарезаемых шестерни и колеса¹, мм;

- высота ножки зуба долбяка

$$h_{f0} = h_{a1,2} + c = m + c = 2 + 0,25 \cdot 2 = 2,5 \text{ мм,}$$

где $h_{a1,2}$ – высота головки зубьев нарезаемых шестерни и колеса, мм; в случае, если $m \leq 2,5$ мм, то $c = 0,25m$, если же $m > 2,5$ мм, то $c = 0,3m$.

11. Рассчитывается диаметр окружности выступов зуборезного долбяка в исходном сечении

$$d_{a0\text{исх}} = d_0 + 2,5m = 100 + 2,5 \cdot 2 = 105 \text{ мм.}$$

12. Определяется толщина зуба долбяка на окружности выступов в исходном сечении

$$S_{a0\text{исх}} = d_{a0\text{исх}} \cdot \left(\frac{S_0}{d_0} + \text{inv}\alpha - \text{inv}\alpha_{a0\text{исх}} \right),$$

где $\cos\alpha_{a0\text{исх}} = \frac{d_{b0}}{d_{a0\text{исх}}} = \frac{d_0 \cos\alpha_0}{d_{a0\text{исх}}}$; $\text{inv}\alpha = \text{tg}\alpha - \alpha$;

$\text{inv}\alpha_{a0\text{исх}} = \text{tg}\alpha_{a0\text{исх}} - \alpha_{a0\text{исх}}$ (величины углов α и $\alpha_{a0\text{исх}}$ задаются в радианах).

Тогда для проектируемого долбяка

$$\cos\alpha_{a0\text{исх}} = \frac{d_0 \cos\alpha_0}{d_{a0\text{исх}}} = \frac{100 \cos 20^\circ 20' 49''}{105} = 0,89296;$$

$$\alpha_{a0\text{исх}} = \arccos 0,89296 = 26^\circ 45' 09'';$$

$$\text{inv}\alpha = \text{tg}\alpha - \alpha = \text{tg}0,349066 - 0,349066 = 0,014904;$$

¹ Индекс 1 относится к шестерни, индекс 2 – к колесу, а индексы 1, 2 относятся одновременно к двум элементам рассматриваемой пары.

$$\operatorname{inv}\alpha_{a0\text{исх}} = \operatorname{tg}\alpha_{a0\text{исх}} - \alpha_{a0\text{исх}} = \operatorname{tg}0,466919 - 0,466919 = 0,037177 ;$$

$$S_{a0\text{исх}} = d_{a0\text{исх}} \cdot \left(\frac{S_0}{d_0} + \operatorname{inv}\alpha - \operatorname{inv}\alpha_{a0\text{исх}} \right) =$$

$$= 105 \cdot \left(\frac{3,003}{100} + 0,014904 - 0,037177 \right) = 0,814 \text{ мм.}$$

13. Рассчитывается минимально допустимая толщина нового зуба долбяка на окружности выступов, исходя из условия обеспечения механической прочности

$$S_{a0} = \sqrt{0,25938 \cdot m - 0,03752} = \sqrt{0,25938 \cdot 2 - 0,03752} = 0,694 \text{ мм.}$$

Примерные значения допустимой толщины зубьев долбяка на окружности выступов можно определить либо по номограмме, приведенной на рис. 1.6 [3, 11], либо выбрать по табл. 1.9.

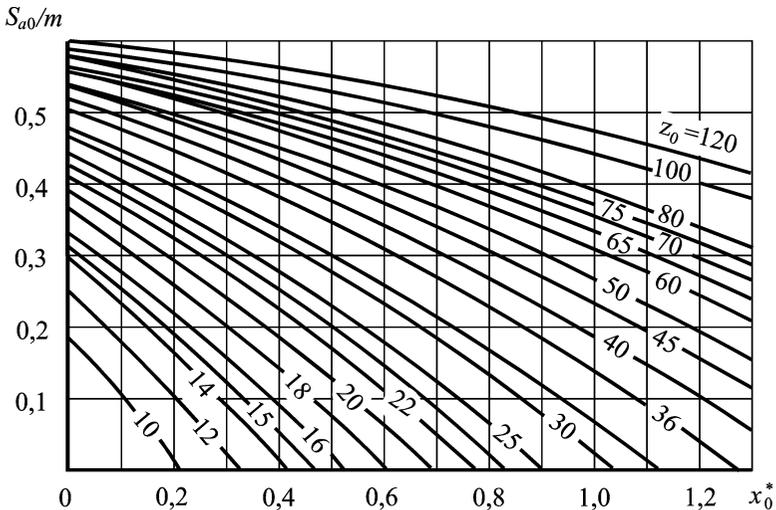


Рис. 1.6. Номограмма, связывающая отношение S_{a0}/m с коэффициентом смещения исходного контура x_0^* для различных чисел зубьев долбяка z_0

Таблица 1.9. Допустимая толщина зуба на окружности выступов [12]

Номинальный делительный диаметр долбяка d_0 , мм	Модуль m_0 , мм	Толщина зуба на окружности выступов S_{a0} , мм
75	1,0...1,5	0,5...0,7
	1,75...2,5	0,8...0,9
	2,75...4,5	1,0...1,1
100	1,0...1,5	0,6...0,7
	1,75...2,5	0,8...0,9
	2,75...4,0	1,0...1,2
	4,5...5,0	1,3...1,4
	5,5...6,0	1,5

14. Определяется исходное расстояние A из условия обеспечения заданной толщины зуба S_{a0} долбяка на основе использования формулы В.Ф. Романова [3]:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{(S_{a0\text{исх}} - S_{a0})d_{a0\text{исх}}}{2 \left(d_{a0\text{исх}} \operatorname{tg} \alpha_{a0\text{исх}} - S_{a0\text{исх}} - \frac{d_{a0\text{исх}}^2}{d_0} \operatorname{tg} \alpha \right) \operatorname{tg} \alpha_B} = \\
 &= \frac{(0,814 - 0,694) \cdot 105}{2 \cdot \left(105 \cdot \operatorname{tg} 26^\circ 45' 09'' - 0,814 - \frac{105^2}{100} \operatorname{tg} 20^\circ \right) \operatorname{tg} 6^\circ} = 5,0 \text{ мм.}
 \end{aligned}$$

Следует отметить, что исходное расстояние A принимается равным расчетному, если $A < 0,5B$, и равным $0,5B$, если $A > 0,5B$, где в качестве B у дисковых долбяков принимается их высота, а у чашечных – длина зуба (см. рис. 1.2, a , b и табл.1.1, 1.3).

Исходное расстояние можно рассчитать также, используя зависимость

$$A = \frac{x_0^* m}{\operatorname{tg} \alpha_B}.$$

Коэффициент смещения исходного контура принимается равным значениям, указанным в табл. 1.1 и 1.3 или в ГОСТ 9323-079 [14].

Значение исходного расстояния, полученное в результате расчета, может быть скорректировано до величин, указанных в ранее упомянутых таблицах.

Методика проектирования зуборезного долбяка с выбранным исходным расстоянием включает его проверку на отсутствие интерференции с переходными кривыми нарезаемых зубьев. Следует отметить, что проверка выполняется только для шестерни и включает выполнение следующего условия при внешнем зацеплении его с колесом:

$$\rho_{p1} > \rho_{l1},$$

где ρ_{p1} – радиус кривизны активного профиля зуба шестерни в нижней начальной контактной точке при внешнем зацеплении её с зубчатым колесом, мм: $\rho_{p1} = a_{\omega 12} \sin \alpha_{\omega 12} - r_{b2} \operatorname{tg} \alpha_{a2}$; $r_{b2} = 0,5mz_2 \cos \alpha$ – радиус основной окружности колеса, мм; ρ_{l1} – радиус кривизны эвольвентного профиля зуба шестерни в точке начала переходной кривой при нарезании её зуборезным долбяком (рис. 1.7), мм.

Параметры, входящие в формулу для определения ρ_{p1} , можно рассчитать по ниже приведенным зависимостям.

Так определение межосевого расстояния в зубчатой передаче производится по формуле

$$a_{\omega 12} = 0,5m(z_1 + z_2).$$

Применительно к проектируемому долбяку

$$a_{\omega 12} = 0,5m(z_1 + z_2) = 0,5 \cdot 2 \cdot (33 + 66) = 99 \text{ мм.}$$

Расчет угла профиля зуба в точке на окружности выступов выполняют по формулам:

- для долбяка

$$\cos \alpha_{a0} = \frac{r_0}{r_{a0}} \cos \alpha_0 = \frac{50}{52,5} \cos 20^\circ 20' 49'' = 0,89296 ,$$

$$\alpha_{a0} = \arccos 0,89296 = 26^\circ 45' 09'' ;$$

- для колеса

$$\cos \alpha_{a2} = \frac{r_2}{r_{a2}} \cos \alpha = \frac{66}{68} \cos 20^\circ = 0,91205 ,$$

$$\alpha_{a2} = \arccos 0,91205 = 24^\circ 12' 35'' ,$$

где r_2 – радиус делительной окружности зубчатого колеса, мм;

r_{a2} – радиус окружности вершин зубьев колеса, мм.

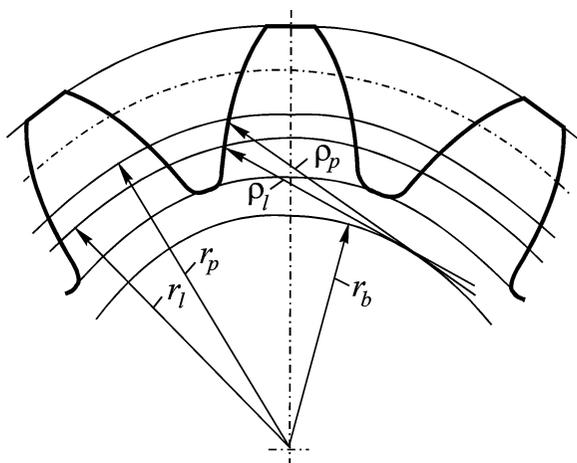


Рис. 1.7. Схема для определения радиуса кривизны активного профиля зуба шестерни

Угол зацепления рассматриваемой кинематической передачи вычисляется по формуле

$$\operatorname{inv} \alpha_{\omega 12} = \operatorname{inv} \alpha_t + \frac{2 \operatorname{tg} \alpha (x_1^* + x_2^*)}{z_1 + z_2} = \operatorname{inv} 20^\circ + \frac{2 \operatorname{tg} 20^\circ \cdot 0}{33 + 66} = 0,014904.$$

В кинематической паре с прямозубыми колесами $\alpha = \alpha_t$, где α_t – угол профиля зуба в торцовом сечении, град.

Тогда с учетом того, что

$$\begin{aligned} r_{b2} &= 0,5mz_2 \cos \alpha = 0,5 \cdot 2 \cdot 66 \cdot \cos 20^\circ = 62,020 \text{ мм}, \\ \rho_{p1} &= a_{\omega 12} \sin \alpha_{\omega 12} - r_{b2} \operatorname{tg} \alpha_{a2} = \\ &= 99 \cdot \sin 20^\circ - 62,020 \cdot \operatorname{tg} 24^\circ 12' 35'' = 5,974 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Числовое значение радиуса кривизны эвольвентного профиля зуба шестерни в точке начала переходной кривой рассчитывается с использованием следующей зависимости

$$\rho_{l1} = a_{\omega 10} \sin \alpha_{\omega 10} - r_{b0} \operatorname{tg} \alpha_{a0},$$

где r_{b0} – радиус основной окружности зуборезного долбяка, мм; $a_{\omega 10}$ – межосевое расстояние в зацеплении шестерни и долбяка на зубодолбежном станке, мм; $\alpha_{\omega 10}$ – угол зацепления нарезаемой шестерни и долбяка, град.

Расчет межосевого расстояния в станочном зацеплении производится по формуле

$$a_{\omega 10} = \frac{m(z_1 + z_0) \cos \alpha}{2 \cos \alpha_{\omega 10}},$$

а угол зацепления шестерни с долбяком на основе использования зависимости

$$\operatorname{inv} \alpha_{\omega 10} = \operatorname{inv} \alpha + \frac{2 \operatorname{tg} \alpha (x_1^* + x_0^*)}{z_1 + z_0},$$

где x_1^* , x_0^* – коэффициенты смещения соответственно изготавливаемой шестерни и зуборезного долбяка.

При этом следует отметить, что при проверке нового долбяка целесообразно воспользоваться зависимостью

$$x_0^* = x_{0\max}^* = \frac{A \operatorname{tg} \alpha_B}{m}.$$

Тогда для проектируемого долбяка и кинематической передачи с параметрами, указанными ранее:

$$\begin{aligned} x_0^* = x_{0\max}^* &= \frac{A \operatorname{tg} \alpha_B}{m} = \frac{5 \cdot \operatorname{tg} 6^\circ}{2} = 0,263 \text{ мм}; \\ \operatorname{inv} \alpha_{\omega 10} &= \operatorname{inv} \alpha + \frac{2 \operatorname{tg} \alpha (x_1^* + x_0^*)}{z_1 + z_0} = \operatorname{inv} 20^\circ + \frac{2 \operatorname{tg} 20^\circ (0 + 0,263)}{33 + 50} = \\ &= 0,014904 + 0,002307 = 0,017211; \\ \alpha_{\omega 10} &= 20^\circ 56' 52''; \\ a_{\omega 10} &= \frac{m(z_1 + z_0) \cos \alpha}{2 \cos \alpha_{\omega 10}} = \frac{2(33 + 50) \cos 20^\circ}{2 \cos 20^\circ 56' 52''} = 83,514 \text{ мм}; \\ \rho_{l1} &= a_{\omega 10} \sin \alpha_{\omega 10} - r_{b0} \operatorname{tg} \alpha_{a0} = \\ &= 83,514 \cdot \sin 20^\circ 56' 52'' - 46,88 \cdot \operatorname{tg} 26^\circ 45' 09'' = 6,226 \text{ мм}. \end{aligned}$$

В том случае, если условие $\rho_{p1} > \rho_{l1}$ не выполняется, следует либо уменьшить числовое значение $x_{0\max}^*$, пересчитав при этом исходное расстояние A , либо увеличить число зубьев зуборезного долбяка. После чего проверка на интерференцию повторяется.

Как видно из выполненных расчетов условие не выполняется
 $\rho_{p1} = 5,974 \text{ мм} < \rho_{l1} = 6,226 \text{ мм}$, поэтому уменьшим значение $x_{0\text{max}}^*$

$$x_0^* = x_{0\text{max}}^* = 0,21; \quad x_{0\text{max}}^* = \frac{A \cdot \text{tg}\alpha_B}{m};$$

$$A = \frac{x_{0\text{max}}^* \cdot m}{\text{tg}6^\circ} = \frac{0,21 \cdot 2}{0,10510} = 3,996 \approx 4,0 \text{ мм.}$$

Вновь определяем угол зацепления шестерни с зуборезным долбяком

$$\text{inv}\alpha_{\omega10} = \text{inv}\alpha + \frac{2\text{tg}\alpha(x_1^* + x_0^*)}{z_1 + z_0} = \text{inv}20^\circ + \frac{2\text{tg}20^\circ(0 + 0,21)}{33 + 50} =$$

$$= 0,014904 + 0,001842 = 0,016746;$$

$$\alpha_{\omega10} = 20^\circ 45' 51'';$$

$$a_{\omega10} = \frac{m(z_1 + z_0)\cos\alpha}{2\cos\alpha_{\omega10}} = \frac{2(33 + 50)\cos 20^\circ}{2\cos 20^\circ 45' 51''} = 83,412 \text{ мм};$$

$$\rho_{l1} = a_{\omega10} \sin\alpha_{\omega10} - r_{b0} \text{tg}\alpha_{a0} =$$

$$= 83,412 \cdot \sin 20^\circ 45' 51'' - 46,88 \cdot \text{tg}26^\circ 45' 10'' = 5,939 \text{ мм.}$$

$$\rho_{p1} = 5,974 \text{ мм} > \rho_{l1} = 5,939 \text{ мм}.$$

Определение геометрических параметров зубьев долбяка на передней поверхности.

15. Расчет окружной толщины зуба S_0' по делительному цилиндру выполняется по формуле

$$S_0' = S_0 + 2A \cdot \text{tg}\alpha \cdot \text{tg}\alpha_B = 3,003 + 2 \cdot 4 \cdot \text{tg}20^\circ \cdot \text{tg}6^\circ = 3,309 \text{ мм.}$$

16. Рассчитывается высота головки зуба долбяка

$$h_{a0}' = h_{a0} + A \text{tg}\alpha_B = 2,5 + 4 \cdot \text{tg}6^\circ = 2,920 \text{ мм.}$$

17. Определяется высота ножки зуба долбяка

$$h'_{f0} = h_{f0} - A \operatorname{tg} \alpha_b = 2,5 - 4 \cdot \operatorname{tg} 6^\circ = 2,080 \text{ мм.}$$

18. Рассчитывается диаметр вершин зубьев долбяка

$$d'_{a0} = d_0 + 2h'_{a0} = 100 + 2 \cdot 2,920 = 105,840 \text{ мм.}$$

19. Определяется диаметр впадин зубьев долбяка

$$d'_{f0} = d_0 - 2h'_{f0} = 100 - 2 \cdot 2,080 = 95,840 \text{ мм.}$$

20. Рассчитывается максимальная величина стачивания долбяка A_c , определяемая прочностью его зубьев и отсутствием подрезания зубьев у изготавливаемых зубчатых колес:

$$A_c = B - A - e = 20 - 4 - \frac{1}{3} 20 = 9,333 \text{ мм,}$$

где B – высота инструмента для дисковых долбяков и высота зуба для чашечных долбяков, мм; e – высота окончательно сточенного дискового долбяка или высота зуба окончательно сточенного чашечного долбяка [$e = (1/4 \dots 1/3)B$, но не менее 5 мм], мм.

21. Выполняется проверка на возможность подрезания ножки зуба шестерни и зубчатого колеса. В процессе нарезания зубчатых венцов подрезание отсутствует, если выполняются условия $\rho_{I1} \geq 0$ – для шестерни и $\rho_{I2} \geq 0$ – для зубчатого колеса. Определение ρ_{I1} и ρ_{I2} следует выполнять по формулам, приведенным в п. 14. При этом

$$x_0^* = x_{0\min}^* = \frac{(A - A_c) \operatorname{tg} \alpha_b}{m} = \frac{(4 - 9,333) \operatorname{tg} 6^\circ}{2} = -0,28;$$

$$\begin{aligned} \operatorname{inv} \alpha_{\omega 10} &= \operatorname{inv} \alpha + \frac{2 \operatorname{tg} \alpha (x_1^* + x_0^*)}{z_1 + z_0} = \operatorname{inv} 20^\circ + \frac{2 \operatorname{tg} 20^\circ (0 + (-0,28))}{33 + 50} = \\ &= 0,014904 - 0,002456 = 0,012448; \end{aligned}$$

$$\alpha_{\omega 10} = 18^\circ 52' 12'' ;$$

$$a_{\omega 10} = \frac{m(z_1 + z_0) \cos \alpha}{2 \cos \alpha_{\omega 10}} = \frac{2(33 + 50) \cos 20^\circ}{2 \cos 18^\circ 52' 12''} = 82,424 \text{ мм};$$

$$\begin{aligned} \rho_{11} &= a_{\omega 10} \sin \alpha_{\omega 10} - r_{b0} \operatorname{tg} \alpha_{a0} = \\ &= 82,424 \cdot \sin 18^\circ 52' 12'' - 46,88 \cdot \operatorname{tg} 26^\circ 45' 09'' = 3,026 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{inv} \alpha_{\omega 20} &= \operatorname{inv} \alpha + \frac{2 \operatorname{tg} \alpha (x_2^* + x_0^*)}{z_2 + z_0} = \operatorname{inv} 20^\circ + \frac{2 \operatorname{tg} 20^\circ (0 + (-0,28))}{66 + 50} = \\ &= 0,014904 - 0,001757 = 0,013147; \end{aligned}$$

$$\alpha_{\omega 20} = 19^\circ 12' 22'' ;$$

$$a_{\omega 20} = \frac{m(z_2 + z_0) \cos \alpha}{2 \cos \alpha_{\omega 20}} = \frac{2(66 + 50) \cos 20^\circ}{2 \cos 19^\circ 12' 22''} = 115,429 \text{ мм};$$

$$\begin{aligned} \rho_{12} &= a_{\omega 20} \sin \alpha_{\omega 20} - r_{b0} \operatorname{tg} \alpha_{a0} = \\ &= 115,429 \cdot \sin 19^\circ 12' 22'' - 46,88 \cdot \operatorname{tg} 26^\circ 45' 09'' = 14,340 \text{ мм}; \end{aligned}$$

Из расчетов следует, что ρ_{11} и ρ_{12} имеют положительные числовые значения, поэтому подрезание ножек зубьев шестерни и колеса в процессе их формообразования – отсутствует.

22. Выполняется проверка на отсутствие срезания головки зуба колеса окончательно сточенным долбяком. Срезание отсутствует, если выполняется условие

$$a_{\omega 20} \sin \alpha_{\omega 20} \geq r_{a2} \sin \alpha_{a2} ;$$

Используя значения параметров, приведенные в п. 14 и 21, получим

$$115,429 \cdot \sin 19^{\circ}12'22'' = 37,972 > 68 \cdot \sin 24^{\circ}12'35'' = 27,885 \text{ мм.}$$

23. Выбор остальных конструктивных параметров долбяка осуществляется по ГОСТ 9323-79 (см. табл. 1.1 и 1.3) либо исходя из конструктивных соображений.

На опорном торце дисковых и чашечных долбяков и на шейке хвостовых долбяков наносят маркировку [14], которая позволяет рабочему (оператору) обеспечить их правильную установку на станке и надлежащие условия эксплуатации:

- товарный знак предприятия-изготовителя;
- обозначение долбяка;
- модуль;
- число зубьев;
- угол профиля;
- обозначение класса точности;
- фактический угол наклона и ход винтовой линии (только для косозубых долбяков);
- материал режущей части;
- год выпуска.

24. Зуборезные долбяки должны удовлетворять техническим требованиям, регламентируемым ГОСТ 9323-79.

24.1. Твердость режущей части долбяков, изготавливаемых из быстрорежущих сталей, должна составлять 63...66 *HRC*, а твердость режущей части долбяков из быстрорежущих сталей с содержанием ванадия, равным и более 3%, и кобальта, равным и более 5%, должна находиться в диапазоне 64...66 *HRC*. Твердость хвостовой части долбяка должна составлять 37...45 *HRC*.

24.2. На всех поверхностях долбяка не должно быть трещин, забоин, выкрошенных мест, заусенцев и следов коррозии.

24.3. Параметры шероховатости поверхностей долбяков не должны превышать значений, указанных для них в табл. 1.10.

Таблица 1.10. Шероховатость поверхности долбяков

Наименование поверхности	Класс точности долбяков	Параметр шероховатости поверхности, мкм	
		<i>Ra</i>	<i>Rz</i>
Передние и задние поверхности зубьев	АА, А В	– –	1,6 2,5
Опорная поверхность дисковых и чашечных долбяков	АА, А, В	0,20	–
Посадочное отверстие дисковых и чашечных долбяков	АА, А, В	0,20	–
Внутренняя опорная поверхность дисковых и чашечных долбяков	АА, А, В	0,80	–
Поверхность хвостовика хвостовых долбяков	А	0,40	–
	В	0,80	–
Остальные поверхности	АА, А, В	2,5	–

24.4. Допуски и предельные отклонения контролируемых параметров чистовых долбяков, приведены в табл. 1.11.

Таблица 1.11. Допуски и предельные отклонения контролируемых параметров долбяков

Параметр	Обозначение	Номинальный делительный диаметр, мм	Класс точности долбяка	Модули, мм				
				От 1 до 2	Св. 2 до 3,5	Св. 3,5 до 6,3	Св. 6,3 до 10	Св. 10
				Допуски и предельные отклонения, мкм				
Отклонение диаметра посадочного отверстия	f_d	Диаметр посадочного отверстия, мм	До 50	АА	+4			–
					50...120	–	+6	
		До 50	А	+5			–	
				50...120	–	+8		
		До 20	В	+6			–	
				20...50	+7			–
50...120	–	+10						

Продолжение табл. 1.11

Параметр	Обозначение	Номинальный делительный диаметр, мм	Класс точности долбяка	Модули, мм				
				От 1 до 2	Св. 2 до 3,5	Св. 3,5 до 6,3	Св. 6,3 до 10	Св. 10
				Допуски и предельные отклонения, мкм				
Биение конуса хвостовых долбяков	f_{rk}	–	A, B	5			–	
Отклонение от перпендикулярности внешней опорной поверхности посадочного отверстия	f_{xy}	До 50	A	4	5	–		
			B	6	8	–		
		50...125	AA	3	4		–	
			A	5	6		–	
		125...200	B	8	10		–	
			AA	–		5		
	A		–		8			
	Отклонение от параллельности опорных поверхностей	f_x	До 50	A	5	6	–	
				B	8	10	–	
50...125			AA	3	4		–	
			A	5	6		–	
125...200			B	8	10		–	
			AA	–		5	6	
		A	–		8			
Торцовое биение передней поверхности		$f_{\gamma t}$	До 50	A	14		–	
				B	20		–	
	50...125		AA	12		–		
			A	16		–		
	125...200		B	25		–		
			AA	–		20		
		A	–		28			
	Отклонение переднего угла	$f_{\gamma a}$	–	B	–		40	
				AA	±5'			
A				±8'				
			B	±12'				

Продолжение табл. 1.11

Параметр	Обозначение	Номинальный делительный диаметр, мм	Класс точности долбяка	Модули, мм				
				От 1 до 2	Св. 2 до 3,5	Св. 3,5 до 6,3	Св. 6,3 до 10	Св. 10
				Допуски и предельные отклонения, мкм				
Отклонение заднего угла	f_{α}	-	AA	±3'				
			A, B	±5'				
Биение окружности вершин зубьев	f_{rra0}	До 50	A	12	16	-		
			B	20	25	-		
		50...125	AA	10	12		-	
			A	16	20		-	
			B	25	32		-	
		125...200	AA	-		16	20	
A	-		25	32				
B	-		40	50				
Отклонение диаметра окружности вершин зубьев	f_{da0}	До 50	A	±320			-	
			B	±320			-	
		50...200	AA	±320	±400	±500	±600	
			B	±400	±500		±600	
Погрешность профиля немодифицированного участка на режущей кромке	f_{f0}	-	AA	3	4		6	
			A	4	5	7	10	
			B	8	10	12	16	20
Отклонение высоты головки зуба	f_{ha0}	-	AA, A, B	±18	±25	±32	±40	±50
Разность соседних окружных шагов	f_{u0}	-	AA	3	4		5	
			A	5	6		8	
			B	8	10		12	
Накопленная погрешность окружного шага	F_{p0}	-	AA	9	11		14	
			A	14	18		22	
			B	20	24	30	36	

Окончание табл. 1.11

Параметр	Обозначение	Номинальный делительный диаметр, мм	Класс точности долбяка	Модули, мм				
				От 1 до 2	Св. 2 до 3,5	Св. 3,5 до 6,3	Св. 6,3 до 10	Св. 10
				Допуски и предельные отклонения, мкм				
Радиальное биение зубчатого венца	F_{r0}	До 50	A	14		16	–	–
			B	20	24	26	–	–
		50...125	AA	12	14			–
			A	16	18	20		–
		125...200	B	24	26	32		–
			AA	–		18		20
			A	–		24		
			B	–		36		40

24.5. Овальность и конусность посадочного отверстия долбяка должны быть в пределах половины допуска на диаметр отверстия.

Не допускаются завалы краев отверстия, выходящие за пределы допускаемых отклонений, суммарной длиной более 25% ширины ступицы долбяка.

Вместе с тем следует отметить, что по согласованию с заказчиком дисковые и чашечные долбяки допускается изготавливать с овальностью и конусностью посадочного отверстия в пределах допуска на его диаметр.

24.6. Неуказанные предельные отклонения размеров: отверстий по $H14$, валов по $h14$, остальных $\pm \frac{IT16}{2}$.

На рис. 1.8 представлен пример конструктивного оформления спроектированного прямозубого зуборезного долбяка, предназначенного для нарезания цилиндрического зубчатого колеса, геометрические параметры которого приведены на рис. 1.4.

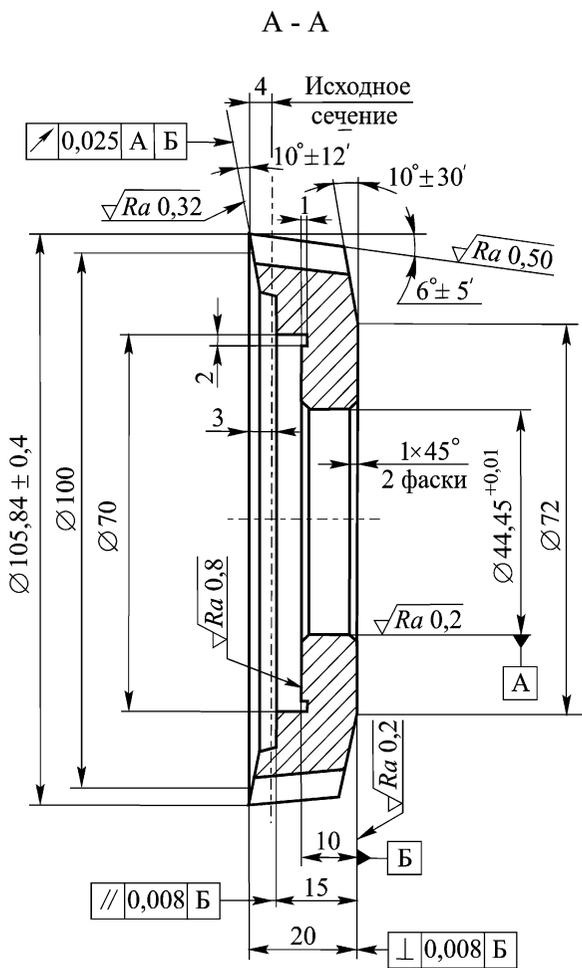


Рис. 1.8. Пример конструктивного оформления прямозубого зуборезного долбяка (см. также с. 41 и 42)

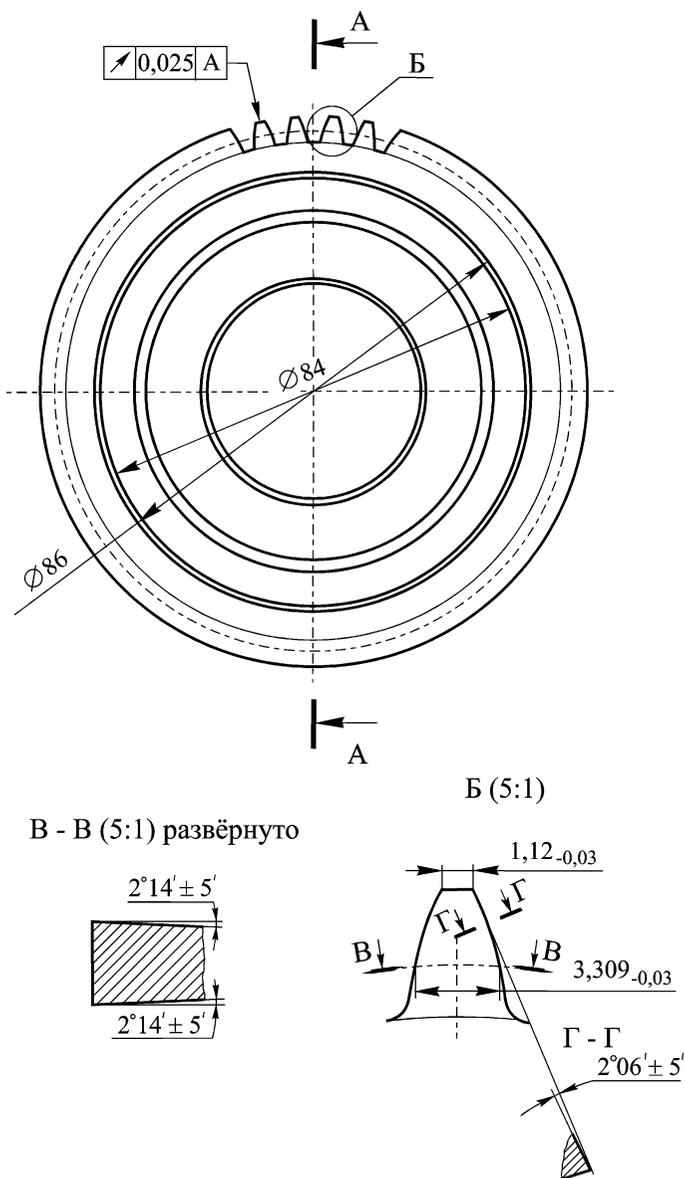


Рис. 1.8. Продолжение

$\sqrt{Ra\ 2,5\ (\surd)}$

Модуль	m	2
Угол профиля	α	20°
Число зубьев долбяка	z_0	50
Номинальный делительный диаметр	d_0	100
Фактический угол профиля	α_0	$20^\circ 20' 49''$
Диаметр основной окружности	d_{b0}	93,760
Толщина зубьев по делительной окружности в исходном сечении	S_0	3,003
Высота головки зуба в исходном сечении	h_{a0}	2,5
Высота ножки зуба в исходном сечении	h_{f0}	2,5
Степень точности долбяка	-	B

1. Твердость 63...66 HRC.
2. Отклонение высоты головки зуба $f_{ha0} \leq \pm 0,018$ мм.
3. Погрешность профиля $f_{f0} \leq 0,008$ мм.
4. Разность соседних окружных шагов $f_{u0} \leq 0,008$ мм.
5. Накопленная погрешность окружных шагов $F_{p0} \leq 0,020$ мм.
6. Радиальное биение зубчатого венца $F_{r0} \leq 0,024$ мм.
7. Неуказанные предельные отклонения размеров:
отверстий по H14, валов по h14, остальных $\pm \frac{IT16}{2}$.
8. Долбяк должен удовлетворять техническим требованиям ГОСТ 9323-79.
9. Маркировать: товарный знак предприятия-изготовителя; обозначение долбяка; модуль; число зубьев; угол профиля; обозначение класса точности; материал режущей части; год выпуска (2530-0204; $m = 2$; $z_0 = 50$; $\alpha = 20^\circ$; B; P6M5; 2023).

Рис. 1.8. Окончание

2. ЧЕРВЯЧНЫЕ МОДУЛЬНЫЕ ФРЕЗЫ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

2.1. НАЗНАЧЕНИЕ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ, ТИПЫ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ

Червячная модульная фреза представляет собой червяк с профилем в виде зуборезной рейки, превращённый в многозубый режущий инструмент путем прорезания стружечных канавок вдоль или под заданным углом к его оси, а также последующего затылования и заточки полученных зубьев [8].

Данными фрезами на специальных зубофрезерных станках можно нарезать как цилиндрические прямозубые и косозубые (винтовые) зубчатые колеса, так и червячные колеса. При этом в процессе обработки заготовки, т.е. при формообразовании зубьев, воспроизводится имитация зацепления червяка с червячным колесом.

Червячные модульные фрезы, как правило, проектируют и изготавливают на базе архимедовых и конволютных червяков, максимально приближённых к эвольвентному червяку. Это обусловлено тем, что изготовление фрез на базе эвольвентных червяков чрезвычайно сложно из-за трудностей, связанных с получением необходимого профиля и его контроля [5].

У фрез, спроектированных на базе архимедова червяка, профиль зубьев принимают прямолинейным в осевом сечении к виткам, а у фрез, спроектированных на базе конволютного червяка, профиль зубьев принимают прямолинейным в нормальном сечении к виткам. В указанных ранее сечениях соответственно задают

и углы профиля фрезы. При этом у фрез, спроектированных на базе архимедова червяка, погрешность профилирования меньше, чем у фрез, спроектированных на базе конволютного червяка [3].

На рис. 2.1 показаны схемы установки червячной модульной фрезы относительно заготовки на зубофрезерном станке. При нарезании цилиндрических прямозубых зубчатых колес ось червячной фрезы устанавливается под углом φ к плоскости, перпендикулярной оси вращения обрабатываемой заготовки (рис. 2.1, а).

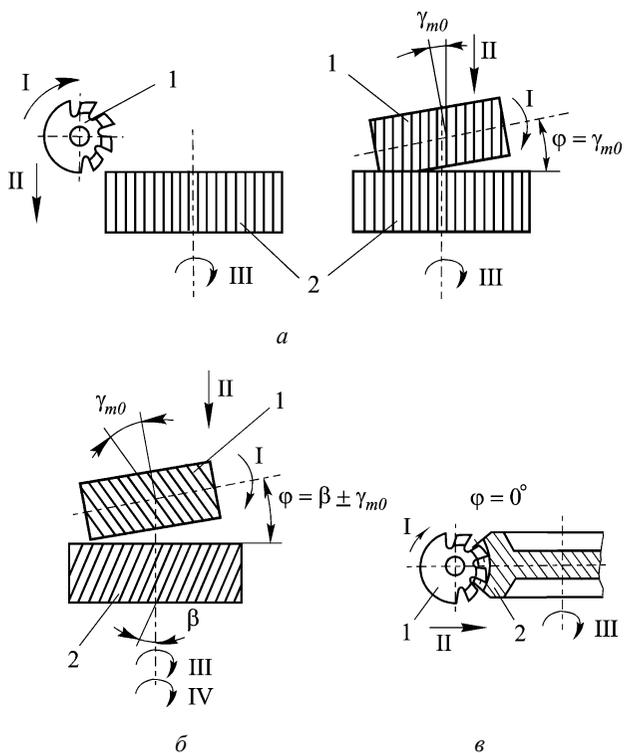


Рис. 2.1. Схемы установки червячной модульной фрезы относительно заготовки:
 а – при нарезании цилиндрических прямозубых колес; б – при нарезании
 цилиндрических колес с винтовым зубом; в – при нарезании червячных колес;
 1 – фреза; 2 – заготовка

При этом величина угла φ равна углу подъема винтовой линии фрезы γ_{m0} на её делительном цилиндре. В случае нарезания цилиндрических колес с винтовым зубом (рис. 2.1, б) значение угла φ может быть рассчитано по формуле $\varphi = \beta \pm \gamma_{m0}$, где β – угол наклона винтовой линии зуба нарезаемого зубчатого колеса. В данной расчётной формуле знак «плюс» ставится при разноименном наклоне зубьев червячной модульной фрезы и нарезаемого зубчатого колеса, а знак «минус» при одноименном. В случае нарезания червячных колес ось фрезы устанавливается всегда горизонтально, т.е. угол $\varphi = 0^\circ$ (рис. 2.1, в). Для формообразования червячных зубчатых колес применяют червячные модульные фрезы, параметры которых полностью соответствуют параметрам червяков, находящихся в контакте с нарезанными зубчатыми колёсами.

При нарезании указанных ранее зубчатых колес фреза получает вращательное движение I вокруг своей оси, которое является главным, и поступательное перемещение, являющееся движением подачи. При нарезании цилиндрических колес подача выполняется по вертикали, а именно при встречном фрезеровании она направлена вниз (см. рис. 2.1, а, б движение II), а при попутном фрезеровании – вверх. В случае нарезания червячных колес подача имеет радиальное направление (см. рис. 2.1, в). При нарезании цилиндрических прямозубых и червячных колёс заготовка, закреплённая на столе зубофрезерного станка, получает только вращательное движение III вокруг своей оси, которое строго согласовано с вращением червячной модульной фрезы. Согласование движений фрезы и заготовки обеспечивает цепь деления зубофрезерного станка. При этом следует отметить, что условие согласования вращения червячной фрезы и заготовки вытекает непосредственно из условия работы червячной пары, а именно: за один полный оборот фрезы заготовка (нарезаемое колесо) в окружном направлении должна

повернуться на величину равную k/z делительной окружности, где k – число заходов червячной модульной фрезы, z – число зубьев нарезаемого колеса.

Отличительной особенностью нарезания зубчатых колес с винтовыми зубьями по сравнению с формообразованием зубьев у прямозубых колёс является то, что к рассмотренным ранее трем движениям следует добавить дополнительное движение IV (рис. 2.1, б). Это движение может выполняться как по часовой, так и против часовой стрелки и зависит от направления линий зуба фрезы и нарезаемого колеса.

Скорость резания при зубофрезеровании зависит от стойкости режущего инструмента, модуля нарезаемого зубчатого колеса и вертикальной подачи. Эмпирическая зависимость, связывающая скорость резания с указанными ранее параметрами процесса зубофрезерования имеет следующий вид:

$$v = \frac{C'_v}{T^m S_v^{x_v} m^{y_v}} k_v,$$

где C'_v , k_v – коэффициенты, учитывающие конкретные условия резания; T – стойкость фрезы, мин; m – модуль нарезаемого колеса, мм; S_v – вертикальная подача фрезы на один оборот заготовки, мм/об; m , x_v , y_v – показатели степеней.

Период стойкости червячных модульных фрез обычно составляет 180...540 мин и назначается в зависимости от их модуля, а величина вертикальной подачи определяется требованиями, предъявляемые к точности зубчатых колес и шероховатости поверхности боковых поверхностей зубьев, и может изменяться от 0,5 до 5 мм на один оборот заготовки [9].

Для нарезания цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем используются цельные, составные и сборные чер-

вячные модульные фрезы. У фрез составной конструкции крепление режущих элементов к корпусу осуществляется посредством сварки, пайки или путем приклеивания, что усложняет технологию их изготовления и нередко приводит к дефектам. Поэтому на практике наибольшее распространение получили цельные и сборные фрезы, представленные на рис. 2.2-2.4.



Рис. 2.2. Червячная
цельная чистовая модульная фреза
с осевым шпоночным пазом



Рис. 2.3. Сборная
червячная модульная фреза
со сменными неперетачиваемыми
пластинами

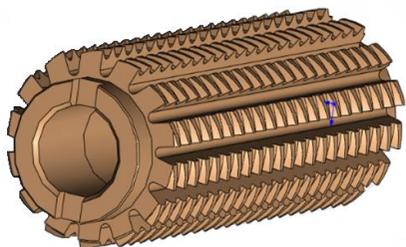


Рис. 2.4. Червячная цельная чистовая
модульная фреза с торцовыми
шпоночными пазами

Сборные червячные фрезы предназначены для нарезания зубчатых колёс с модулем $m \geq 6$ мм. Корпус у этих фрез изготавливается как из конструкционных (45, 30X, 40X, 40XНМА), так и инструментальных (У7, У8, У8А) сталей, а режущие гребёнки, выполняемые из быстрорежущей стали или твёрдого сплава, либо неперетачиваемые быстросменные твердосплавные пластины закрепляются с помощью натяжных колец или клиньев.

У червячных фрез зубья могут иметь либо затылованную, либо остроконечную форму. У цельных фрез, предназначенных для черновой обработки, зубья имеют одинарное затылование и нешлифованный профиль, а у фрез, предназначенных для получистовой и чистовой обработки, – двойное затылование и шлифованный профиль. Острозаточенную форму зуба имеют сборные червячные модульные фрезы. Их отличительной особенностью является наличие увеличенных значений задних углов. Острозаточенные фрезы обладают повышенной стойкостью и производительностью, вместе с тем они более сложны в изготовлении. Кроме того, заточка гребёнок у сборных червячных фрез предполагает их съём с инструмента и использование специального приспособления. По способу крепления на станке фрезы делятся на насадные, имеющие отверстие для оправки и шпоночный паз или пазы (см. рис. 2.2-2.4), и хвостовые (рис. 2.5). Червячные фрезы могут выполняться правозаходными и левозаходными, а также одно- и многозаходными. Число заходов оказывает влияние на производительность и точность нарезания зубчатых колес. В настоящее



Рис. 2.5. Хвостовая червячная модульная фреза

время наибольшее распространение получили однозаходные фрезы, вместе с тем имеет место опыт применения и многозаходных червячных модульных фрез с числом заходов k_0 до 7. В отличие от однозаходных фрез многозаходные фрезы целесообразно применять при предварительном формообразовании профиля зубьев колес, т.е. когда предполагается последующая обработка шевингованием или шлифованием. Многозаходные фрезы обладают большей стойкостью и позволяют повысить производительность процесса обработки.

Выбор конструкции и типа фрезы зависит от исходных данных, включающих: размеры и точность изготавливаемого зубчатого колеса, марку и состояние (термообработку) материала и вид обработки – черновая, получистовая, чистовая.

Чистовые червячные модульные фрезы следует применять в тех случаях, когда нарезание зубьев на заготовке производится после термообработки, а его твердость $HRC \leq 40..42$. При этом класс точности фрезы, предназначенной для формообразования зубчатого венца, назначается исходя из степени точности нарезаемого зубчатого колеса [7, 10, 11]. Если в указанном обозначении точности зубчатого колеса степени точности по нормам кинематической точности, плавности и контакта неодинаковы, то класс точности червячной фрезы следует назначать в зависимости от нормы плавности колеса [10].

Точность получистовых фрез устанавливается на 1-2 класса ниже чистовых. После обработки данными фрезами выполняется шевингование либо шлифование, на что предусмотрен соответствующий припуск. Для чернового зубофрезерования рекомендуется использовать фрезы класса точности D. После данной операции выполняется чистовое зубофрезерование или зубодолбление. На чистовую обработку также предусмотрен соответствующий припуск.

Рассмотрим процесс проектирования цельных червячных модульных фрез.

В соответствии с ГОСТ 9324-2015 [15] цельные чистовые червячные фрезы изготавливаются двух типов, а именно: с осевым шпоночным пазом – тип 1 и с торцовым шпоночным пазом – тип 2. Указанные типы фрез представлены на рис. 2.6 и могут быть выполнены в двух исполнениях: с уменьшенными габаритными размерами – для модулей от 0,5 до 2 мм включительно (исполнение 1) и с нормальными габаритными размерами – для модулей от 1,0 до 40 мм включительно (исполнение 2). Данные фрезы, как следует из ГОСТ 9324-2015, изготавливаются классов точности: 4А, 3А, 2А, А, В, С и D и предназначены соответственно для изготовления цилиндрических зубчатых колес 5, 6, 7, 8, 9, 10 и 11 степеней точности. Червячные модульные фрезы классов точности 4А, 3А, 2А, А, В, С изготавливаются со шлифованным профилем, а фрезы класса D могут изготавливаться как со шлифованным, так и нешлифованным профилем.

Основные параметры червячных цельных чистовых модульных фрез (см. рис. 2.6), предназначенных для изготовления цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем, должны соответствовать значениям, указанным в табл. 2.1-2.4.

Вместе с тем следует отметить, что точность зубонарезания зависит не только от класса точности используемой червячной фрезы, но в значительной мере также и от точности станка и заготовки. Для нарезания зубчатых колес применяются специальные зубофрезерные станки как отечественных моделей 53А11, 5А324П, 53А50, 53К30Ф3, 53С50Ф4 и др., так и различных зарубежных фирм.

Проектирование и расчет червячных фрез включает в себя выбор конструкции, инструментального материала, основных параметров фрезы и геометрии режущей части, а также определение

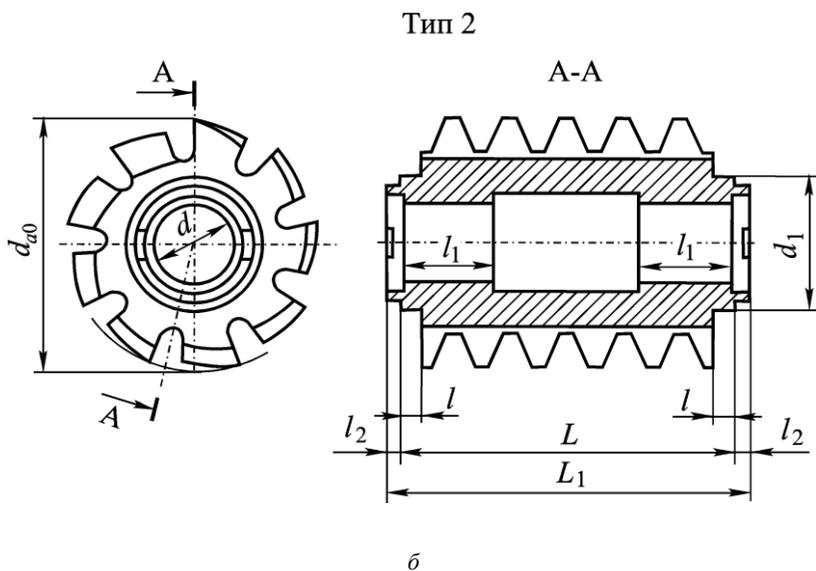
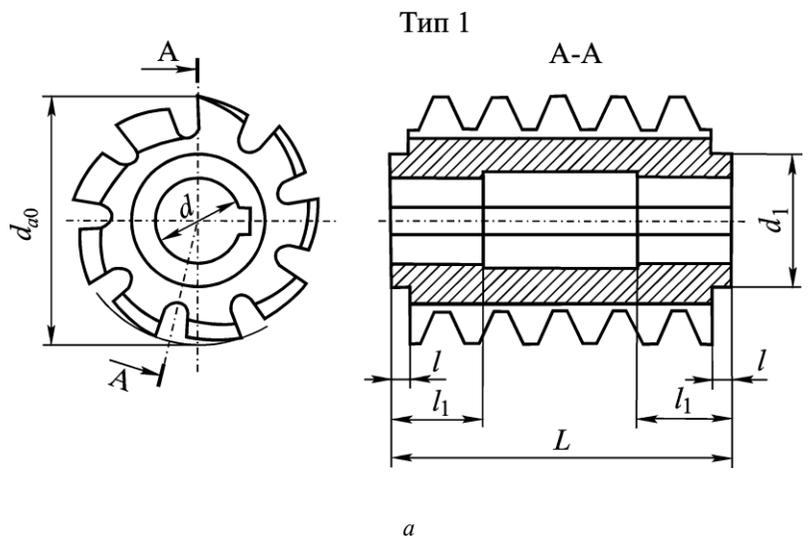


Рис. 2.6. Чистовые червячные модульные фрезы:
 а – с осевым шпоночным пазом; б – с торцовыми шпоночными пазами

Таблица 2.1. Основные параметры червячных цельных чистовых модульных фрез исполнения 1 [15]

Модуль m_0 для ряда		d_{a0} , мм	d , мм	L , мм	L_1 , мм	l , мм не менее	z_k
1	2						
0,5	–	24	8	10	–	1	12
–	0,55	24	8	10	–	1	12
0,6	–	24	8	10	–	1	12
–	0,7	24	8	10	–	1	12
–	0,75	24	8	12	–	1	12
0,8	–	24	8	12	–	1	12
–	0,9	24	8	12	–	1	12
1	–	24	8	12	–	1	12
0,5	–	32	10	20	30	2	12
–	0,55	32	10	20	30	2	12
0,6	–	32	10	20	30	2	12
–	0,7	32	10	20	30	2	12
–	0,75	32	10	20	30	2	12
0,8	–	32	10	20	30	2	12
–	0,9	32	10	20	30	2	12
1	–	32	10	20	30	2	12
–	1,125	32	10	20	30	2	12
1,25	–	40	10	25	35	2	10
–	1,375	40	10	25	35	2	10
1,5	–	40	10	25	35	2	10
–	1,75	40	10	30	40	2	10
2	–	40	10	30	40	2	10
0,5	–	32	13	20	30	2	12
–	0,55	32	13	20	30	2	12
0,6	–	32	13	20	30	2	12
–	0,7	32	13	20	30	2	12
–	0,75	32	13	20	30	2	12
0,8	–	32	13	20	30	2	12
–	0,9	32	13	20	30	2	12
1	–	32	13	20	30	2	12
–	1,125	32	13	20	30	2	12
1,25	–	40	13	25	35	2	10
–	1,375	40	13	25	35	2	10
1,5	–	40	13	25	35	2	10
–	1,75	40	13	30	40	2	10
2	–	40	13	30	40	2	10

Таблица 2.2. Основные параметры червячных цельных чистовых модульных фрез исполнения 2 [15]

Модуль m_0 для ряда		d_{a0} , мм	d , мм	L , мм	L_1 , мм	l , мм не менее	z_k
1	2						
1	–	50	22	50	65	4	14
–	1,125	50	22	50	65	4	14
1,25	–	50	22	50	65	4	14
–	1,375	50	22	50	65	4	14
1,5	–	55	22	55	70	4	14
–	1,75	55	22	55	70	4	14
2	–	65	27	60	75	4	14
–	2,25	65	27	60	75	4	14
2,5	–	70	27	65	80	4	14
–	2,75	70	27	65	80	4	14
3	–	75	32	70	85	4	14
–	3,5	80	32	75	90	4	14
4	–	85	32	80	95	4	14
–	4,5	90	32	85	100	4	14
5	–	95	32	90	105	4	14
–	5,5	100	32	95	110	5	12
6	–	105	32	100	115	5	12
–	6,5	110	32	110	125	5	12
–	7	115	32	115	130	5	12
8	–	120	32	140	160	5	10
–	9	125	32	140	160	5	10
10	–	130	32	170	190	5	10
–	11	150	40	170	190	6	9
12	–	160	40	200	220	6	9
–	14	180	40	200	220	6	9
16	–	200	50	250	275	6	9
–	18	220	50	250	275	6	9
20	–	240	60	300	325	6	9
–	22	250	60	300	325	6	9
25	–	280	60	360	385	6	9
–	28	320	80	400	430	6	9
32	–	350	80	450	480	6	9
–	36	380	80	450	480	6	9
40	–	400	80	480	510	6	9

Таблица 2.3. Основные размеры червячных цельных чистовых многозаходных модульных фрез исполнения 1 [15]

Модуль m_0 для ряда		Число заходов k_0							
		1				2			
1	2	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка γ_{m0}	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка γ_{m0}
0,5	–	24	8	1035	1°16'	32	10	945	1°52'
–	0,55	24	8	930	1°24'	32	10	852	2°04'
0,6	–	24	8	843	1°32'	32	10	775	2°15'
–	0,65	24	8	770	1°40'	32	10	709	2°27'
–	0,7	24	8	707	1°48'	32	10	653	2°39'
–	0,75	24	8	652	1°57'	32	10	604	2°51'
0,8	–	24	8	605	2°05'	32	10	562	3°03'
–	0,9	24	8	525	2°22'	32	10	491	3°28'
1	–	24	8	462	2°40'	32	10	434	3°53'
0,5	–	32	10	1891	0°56'	32	10	945	1°52'
–	0,55	32	10	1705	1°02'	32	10	852	2°04'
0,6	–	32	10	1550	1°08'	32	10	775	2°15'
–	0,65	32	10	1419	1°14'	32	10	709	2°27'
–	0,7	32	10	1307	1°20'	32	10	653	2°39'
–	0,75	32	10	1210	1°26'	32	10	604	2°51'
0,8	–	32	10	1125	1°32'	32	10	562	3°03'
–	0,9	32	10	983	1°44'	32	10	491	3°28'
1	–	32	10	870	1°57'	32	10	434	3°53'
–	1,125	32	10	757	2°13'	32	10	378	4°25'
1,25	–	40	10	1087	1°57'	40	10	543	3°53'
–	1,375	40	10	972	2°09'	40	10	485	4°19'
1,5	–	40	10	875	2°22'	40	10	437	4°45'
–	1,75	40	10	724	2°49'	40	10	361	5°38'
2	–	40	10	611	3°17'	40	10	304	6°34'

Окончание табл. 2.3

Модуль m_0 для ряда		Число заходов k_0			
		3			
1	2	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка γ_{m0}
0,5	–	32	10	630	2°48'
–	0,55	32	10	568	3°05'
0,6	–	32	10	516	3°23'
–	0,65	32	10	472	3°41'
–	0,7	32	10	435	3°59'
–	0,75	32	10	402	4°17'
0,8	–	32	10	374	4°35'
–	0,9	32	10	326	5°12'
1	–	32	10	289	5°50'
0,5	–	32	10	630	2°48'
–	0,55	32	10	568	3°05'
0,6	–	32	10	516	3°23'
–	0,65	32	10	472	3°41'
–	0,7	32	10	435	3°59'
–	0,75	32	10	402	4°17'
0,8	–	32	10	375	4°35'
–	0,9	32	10	326	5°12'
1	–	32	10	289	5°50'
–	1,125	32	10	251	6°38'
1,25	–	40	10	361	5°50'
–	1,375	40	10	322	6°29'
1,5	–	40	10	290	7°08'
–	1,75	40	10	239	8°28'
2	–	40	10	201	9°52'

Примечание. P_z – ход винтовой стружечной канавки.

Таблица 2.4. Основные размеры червячных цельных чистовых многозаходных модульных фрез исполнения 2 [15]

Модуль m_0 для ряда		Число заходов k_0									
		1					2				
1	2	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка $\gamma_{\text{по}}$	Число канавок не более	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка $\gamma_{\text{по}}$	Число канавок не более
1	–	50	22	2256	1°12'	16	55	22	1377	2°11'	17
–	1,125	50	22	1979	1°22'	16	55	22	1209	2°28'	17
1,25	–	50	22	1757	1°32'	16	55	22	1075	2°46'	17
–	1,375	50	22	1576	1°42'	16	55	22	965	3°03'	17
1,5	–	55	22	1750	1°41'	16	60	22	1053	3°03'	17
–	1,75	55	22	1464	1°59'	16	60	22	882	3°36'	17
2	–	65	27	1799	1°55'	16	70	27	1054	3°32'	17
–	2,25	65	27	1566	2°10'	15	80	32	1227	3°28'	17
2,5	–	70	27	1624	2°15'	15	85	32	1238	3°38'	18
–	2,75	70	27	1448	2°30'	15	85	32	1107	4°02'	18
3	–	75	32	1517	2°33'	15	90	32	1131	4°10'	18
–	3,5	80	32	1449	2°49'	14	100	32	1186	4°24'	18
4	–	85	32	1404	3°03'	14	115	32	1374	4°22'	19
–	4,5	90	32	1376	3°17'	14	120	32	1310	4°45'	19
5	–	95	32	1359	3°28'	14	125	32	1261	5°06'	19
–	5,5	100	32	1350	3°39'	13	135	32	1331	5°12'	19
6	–	105	32	1347	3°49'	13	140	32	1296	5°31'	18
–	6,5	110	32	1349	3°59'	13	150	40	1370	5°35'	18
–	7	115	32	1355	4°07'	13	155	40	1343	5°51'	18
8	–	120	32	1246	4°35'	12	160	40	1217	6°34'	17
–	9	125	32	1163	5°02'	12	170	40	1200	7°01'	16
10	–	130	32	1097	5°28'	12	180	40	1191	7°25'	16
–	11	150	40	1359	5°09'	11	200	50	1342	7°20'	16
12	–	160	40	1402	5°18'	11	210	50	1338	7°40'	15
–	14	180	40	1495	5°32'	10	240	60	1487	7°51'	15

Продолжение табл. 2.4

Модуль m_0 для ряда		Число заходов k_0									
		1					2				
1	2	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка γ_{m0}	Число канавок не более	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка γ_{m0}	Число канавок не более
16	–	200	50	1592	5°44'	10	270	60	1637	8°00'	15
–	18	220	50	1692	5°54'	10	–				
20	–	240	60	1795	6°03'	10					
–	22	250	60	1717	6°29'	10					
25	–	280	60	1880	6°36'	10					
–	28	320	80	2218	6°26'	10					
32	–	350	80	2262	6°48'	9					
–	36	380	80	2318	7°08'	9					
40	–	400	80	2330	7°40'	9					

Продолжение табл. 2.4

Модуль m_0 для ряда		Число заходов k_0									
		3					4				
1	2	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка γ_{m0}	Число канавок не более	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка γ_{m0}	Число канавок не более
1	–	60	22	1101	2°59'	18	85	32	1700	2°47'	23
–	1,125	60	22	967	3°23'	18	90	32	1687	2°58'	23
1,25	–	60	22	861	3°47'	18	95	32	1686	3°07'	25
–	1,375	65	27	917	3°51'	19	95	32	1522	3°27'	25
1,5	–	70	27	973	3°54'	19	100	32	1541	3°34'	25
–	1,75	80	32	1087	3°59'	20	110	32	1590	3°48'	25
2	–	90	32	1201	4°03'	20	120	32	1649	3°59'	25

Продолжение табл. 2.4

Модуль m_0 для ряда		Число заходов k_0									
		3					4				
1	2	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка γ_{m0}	Число канавок не более	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка γ_{m0}	Число канавок не более
–	2,25	100	32	1316	4°06'	22	120	32	1449	4°31'	25
2,5	–	110	32	1431	4°09'	22	120	32	1289	5°03'	25
–	2,75	110	32	1285	4°35'	22	130	32	1373	5°08'	25
3	–	115	32	1280	4°48'	22	130	32	1245	5°37'	27
–	3,5	125	32	1282	5°11'	22	150	40	1418	5°41'	27
4	–	140	32	1402	5°18'	22	170	40	1592	5°44'	27
–	4,5	150	40	1419	5°35'	22	180	40	1573	6°07'	27
5	–	160	40	1443	5°50'	22	190	40	1565	6°28'	27
–	5,5	170	40	1471	6°04'	22	200	50	1566	6°47'	27
6	–	175	40	1413	6°28'	22	210	50	1572	7°04'	27

Продолжение табл. 2.4

Модуль m_0 для ряда		Число заходов k_0									
		5					6				
1	2	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка γ_{m0}	Число канавок не более	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка γ_{m0}	Число канавок не более
1	–	85	32	1359	3°28'	23	85	32	1131	4°10'	23
–	1,125	90	32	1349	3°42'	23	90	32	1123	4°26'	23
1,25	–	95	32	1347	3°54'	25	95	32	1122	4°41'	25
–	1,375	95	32	1216	4°18'	25	95	32	1012	5°10'	25
1,5	–	100	32	1231	4°28'	25	100	32	1025	5°22'	25
–	1,75	110	32	1271	4°45'	25	110	32	1057	5°42'	25
2	–	120	32	1317	4°59'	25	120	32	1096	5°59'	25

Продолжение табл. 2.4

Модуль m_0 для ряда		Число заходов k_0									
		5					6				
1	2	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка γ_{m0}	Число канавок не более	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка γ_{m0}	Число канавок не более
–	2,25	120	32	1157	5°39'	25	120	32	962	6°47'	25
2,5	–	120	32	1029	6°19'	25	120	32	855	7°35'	25
–	2,75	130	32	1096	6°25'	25	130	32	910	7°42'	25
3	–	130	32	993	7°02'	27	130	32	825	8°27'	27
–	3,5	150	40	1131	7°07'	27	150	40	940	8°33'	27

Окончание табл. 2.4

Модуль m_0 для ряда		Число заходов k_0				
		7				
1	2	d_{a0} , мм	d , мм	P_z , мм	Угол подъема витка γ_{m0}	Число канавок не более
1	–	85	32	969	4°52'	23
–	1,125	90	32	961	5°11'	23
1,25	–	95	32	960	5°28'	25
–	1,375	95	32	866	6°02'	25
1,5	–	100	32	877	6°16'	25
–	1,75	110	32	905	6°40'	25
2	–	120	32	938	7°00'	25
–	2,25	120	32	823	7°55'	25
2,5	–	120	32	731	8°51'	25
–	2,75	130	32	778	9°00'	25
3	–	130	32	704	9°52'	27
–	3,5	150	40	802	9°59'	27

Примечание. P_z – ход винтовой стружечной канавки.

параметров профиля зуба в нормальном и осевом сечениях, величин падения затылков, угла наклона, шага, профиля и глубины стружечных канавок фрезы и т.д. При проектировании червячных модульных фрез на базе чистовых фрез, соответствующих ГОСТ 9324-2015, их основные параметры: наружный диаметр d_{a0} , диаметр посадочного отверстия фрезы d , длину фрезы L , профильный угол исходного контура инструментальной рейки (угол профиля зуба) в нормальном сечении α_{n0} , длину буртика l , число стружечных канавок z_k равных числу зубьев z_0 – целесообразно назначать по табл. 2.1-2.4. Для фрез, отличающихся от приведенных в ГОСТ 9324-2015, их основные конструктивные элементы и параметры определяются на основе расчета и опыта эксплуатации данного инструмента.

2.2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЧЕРВЯЧНЫХ ЦЕЛЬНЫХ МОДУЛЬНЫХ ФРЕЗ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НАРУЖНЕГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Выполним расчет цельной чистовой червячной модульной фрезы, предназначенной для нарезания цилиндрического зубчатого колеса, представленного на рис. 1.4, имеющего следующие исходные данные: $m_n = 2$ мм; $\alpha = 20^\circ$; $h_a^* = 1$; $c^* = 1$; $\beta = 0^\circ$; $z_1 = 33$ (шестерни); $z_2 = 66$ (колеса); $x_1^* = 0$; $x_2^* = 0$, т.е. того же самого прямозубого зубчатого колеса, что и при проектировании долбяка (см. 1.2).

Расчет производится в последовательности, составленной на основе рекомендаций, приведенных в работах [3, 10, 11], и подробно изложенной далее по тексту.

1. Выбираем тип и вид исполнения фрезы. ГОСТ 9324-2015 предусматривает два типа и два вида исполнения червячных цель-

ных модульных фрез. Поэтому, исходя из данного стандарта, выбираем фрезу типа 1 исполнения 2, выполненную на базе конволютного червяка, т.к. фреза предназначена для получистовой обработки.

2. Исходя из марки материала зубчатого колеса, выбирается инструментальный материал фрезы.

Для изготовления червячных модульных фрез применяют как быстрорежущие стали (Р6М5, 10Р6М5, Р9К10, Р6М5К5 и др.), так и твердые сплавы (ВК6-М, ВК8, ВК10-ОМ, Т5К10 и др.). В настоящее время порядка 20% всех червячных модульных фрез изготавливается из твёрдых сплавов. При нарезании зубчатых колес из углеродистых сталей, таких марок как 35, 40, 45, 50 и др., и низколегированных конструкционных сталей, например, 20Х, 35Х, 40Х, 40ХН, 12ХНЗА, 12Х2Н4А, 20ХНЗА, 18ХГТ и т.д., предел прочности которых $\sigma_b \leq 1000$ МПа, а также чугуна и цветных сплавов твердостью $HB \leq 230$ рекомендуется применять червячные модульные фрезы из быстрорежущих сталей Р6М5, 10Р6М5, Р9, Р18. При нарезании зубчатых венцов у колес из высокопрочных сталей, в частности АС20ХГНМ, 18Х2Н4ВА, 30Х2Н2ВФМА, 35ХГСА, 40ХН2МА, теплостойких сталей 20Х3НВФА, 20Х3МВФ-Ш (ЭИ415), 13Х3НВМ2Ф-Ш (ВКС4), 16Х3НВФМБ-Ш (ВКС5), 16Х2НЗМФБАЮ-Ш (ВКС7) и титановых сплавов ВТ6, ВТ8, предел прочности которых $\sigma_b > 1000$ МПа, рекомендуется использовать быстрорежущие фрезы марок Р9К5, Р9К10, Р9Ф5, Р14Ф4, Р18К5Ф2Ю, Р10К5Ф5, а также твердые сплавы ВК6М, ВК6-ОМ, ВК8, ВК10-ОМ, Т5К10, Т14К8, Т15К6 и др. желательно с нанесенными износостойкими покрытиями. Обычно на фрезы из быстрорежущей стали наносят такие износостойкие покрытия как TiN, TiCN, TiAlN, а на фрезы из твердых сплавов – NiCN, NiAlN, AlGrN, NiAlGrN.

С учетом ранее изложенных сведений для нарезания зубчатого венца у колеса из стали 40Х, представленного на рис. 1.4, спроектируем цельную червячную модульную фрезу из быстрорежущей стали 10P6M5 ГОСТ 19265-73, технические требования на изготовление которой будут содержать и нанесение на её поверхность износостойкого покрытия TiAlN.

3. Решается вопрос о точности изготовления фрезы. Как следует из рабочего чертежа зубчатого колеса, степень точности его изготовления и вид сопряжения соответствуют 7-С. Для получения указанной точности и твердости 45...50 HRC необходимо вначале нарезать зубчатый венец у заготовки, обеспечив 8 степень точности, а затем выполнить его шлифование после термообработки. Поэтому для нарезания зубчатого колеса, упомянутого ранее, будем использовать червячную модульную фрезу для получистовой обработки класса точности А.

4. Определяется наружный диаметр новой фрезы d_{a0} (рис. 2.7). Увеличение наружного диаметра фрезы, как отмечено в работах [3, 10, 11], способствует снижению погрешности профилирования зубьев колеса как у однозаходных, так и многозаходных фрез, а также увеличению диаметра посадочного отверстия d и, следовательно, диаметра оправки, что позволяет повысить жесткость технологической системы и увеличить количество режущих зубьев у фрезы. Все это приводит к повышению производительности процесса зубофрезерования и увеличению количества возможных переточек инструмента, а также снижению шероховатости и огранки на поверхности зубьев обработанного колеса за счет увеличения количества резов при профилировании зубьев. В то же время при увеличении d_{a0} повышается расход инструментального материала, увеличиваются момент резания и себестоимость фрезы. С учётом вышеизложенного стандартом (ГОСТ 9324-2015), как уже отмечалось ранее по тексту, рекомендованы числовые значения

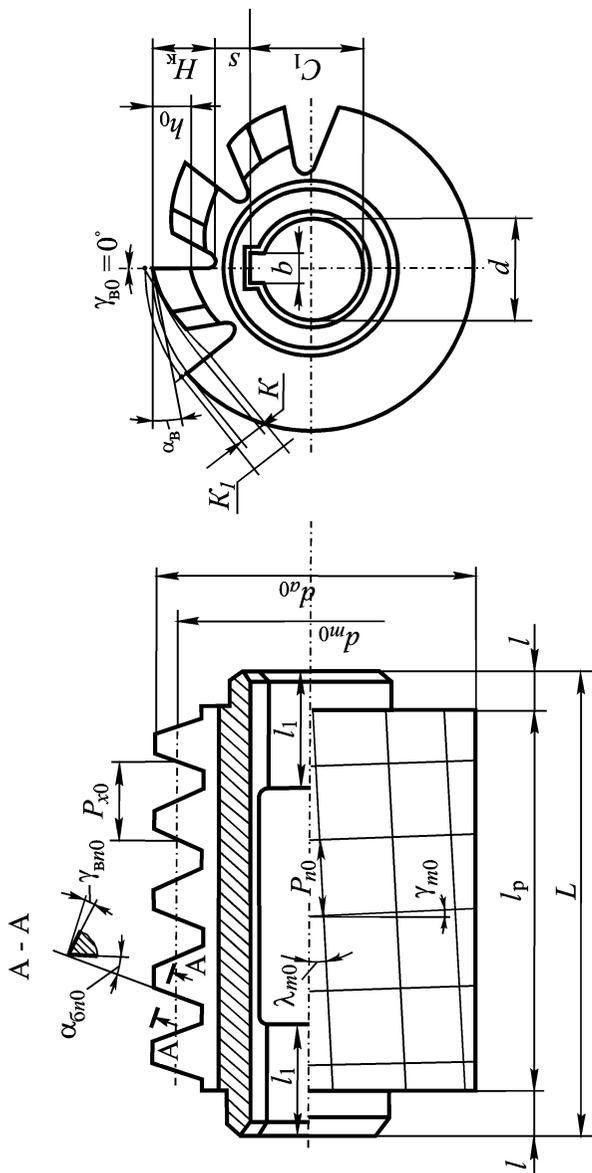


Рис. 2.7. Конструктивные элементы и параметры червячных модульных фрез

основных параметров однозаходных и многозаходных червячных модульных фрез, приведенные в табл. 2.1-2.4, к числу которых относится и наружный диаметр. Поэтому при известной величине модуля фрезы предварительно данный параметр может быть выбран посредством использования указанных таблиц. Применительно к проектируемой фрезе её наружный диаметр предварительно следует принять равным $d_{a0} = 65$ мм.

5. Назначается число заходов фрезы k_0 и предварительное число зубьев z_0 . Целые червячные модульные фрезы выполняются с числом заходов от 1 до 7. Однозаходные фрезы проще в изготовлении и эксплуатации и обеспечивают более высокую точность обработки по сравнению с многозаходными фрезами, но в то же время менее производительны. При проектировании фрезы следует учитывать, что число заходов у неё, во-первых, не должно быть кратным числу зубьев нарезаемого колеса z_2 , а, во-вторых, числу зубьев фрезы z_0 , т.е. числу её гребёнок (реек). Число заходов у фрезы рекомендуется выбирать в зависимости от вида обработки при зубофрезеровании, а именно: черновой, получистовой или чистовой.

Для получистового зубофрезерования зубчатого венца, соответствующего 8 степени точности, о чем говорилось в п. 3, при изготовлении колеса, представленного на рис. 1.4, следует использовать червячные фрезы с числом заходов равным 1-2 [10]. Так как это колесо имеет четное число зубьев, то в соответствии с рекомендациями, приведенными ранее по тексту, при проектировании фрезы для обработки указанного колеса следует принять число заходов равным 1, а число зубьев фрезы, согласно табл. 2.2, $z_0 = 14$.

6. Выбираются и рассчитываются величины переднего угла на вершине зубьев $\gamma_{в0}$ и на боковых сторонах профиля зубьев в нормальном сечении $\gamma_{вл0}$ (см. рис. 2.7). Выбор величины $\gamma_{в0}$ зависит

от назначения фрезы и свойств обрабатываемого материала зубчатого колеса. У стандартных чистовых фрез (ГОСТ 9324-2015) $\gamma_{в0} = 0^\circ$. В этом случае профиль зуба фрезы соответствует профилю инструментальной рейки. Однако, как показывает практика, с увеличением величины переднего угла улучшаются условия процесса резания при зубофрезеровании и стойкость инструмента. Поэтому у полустойких и черновых червячных модульных фрез из быстрорежущих сталей $\gamma_{в0} = 5...15^\circ$, а у фрез из твёрдых сплавов $\gamma_{в0} = 0...5^\circ$. Причем меньшие значения угла назначаются при обработке зубчатых колес из твердых и прочных материалов. Исходя из ранее изложенных рекомендаций, у проектируемой фрезы угол $\gamma_{в0}$ принимаем равным 5° . Тогда нормальный передний угол на боковых сторонах профиля зуба фрезы рассчитывается по формуле

$$\operatorname{tg}\gamma_{вн0} = \operatorname{tg}\gamma_{в0} \cdot \sin \alpha = \operatorname{tg}5^\circ \cdot \sin 20^\circ = 0,02992 ;$$

$$\gamma_{вн0} = \operatorname{arctg}0,02992 = 1^\circ 42' 50'' .$$

7. Назначаются и рассчитываются соответственно значения заднего угла на вершине зубьев $\alpha_{в}$ и на боковых сторонах зубьев фрезы в нормальном сечении $\alpha_{бн0}$. Задние углы как на вершинах, так и боковых сторонах зубьев червячной фрезы получают посредством их затылования по архимедовой спирали. Как следует из работ [3, 10, 11], величина заднего угла на вершине зубьев может находиться в диапазоне от 8° до 12° . Для проектируемой фрезы принимаем $\alpha_{в} = 10^\circ$.

Принятое значение $\alpha_{в}$ проверяется посредством расчета заднего бокового угла в нормальном сечении $\alpha_{бн0}$. Как известно, червячные модульные фрезы могут изготавливаться с прямыми –

осевыми ($\lambda_{m0} = 0^\circ$) или винтовыми ($\lambda_{m0} = \gamma_{m0}$) стружечными канавками (см. рис. 2.7). Здесь λ_{m0} – угол наклона стружечной канавки, град; γ_{m0} – угол подъема витков червяка на делительном цилиндре диаметром d_{m0} , град. Прямые стружечные канавки обеспечивают большую равномерность фрезерования, а винтовые – лучшую точность [3]. Согласно методике, приведенной в работе [11], величина угла $\alpha_{\delta n0}$ в точке, лежащей на произвольном радиусе r_{i0} , рассчитывается по следующим формулам:

- для фрез с прямыми канавками

$$\alpha_{\delta n0} = \operatorname{arctg} \left(\frac{r_{a0}}{r_{i0}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \sin \alpha_{n0} \right),$$

где r_{a0} – радиус наружной окружности фрезы, мм; r_{i0} – радиус произвольной окружности, не выходящей за пределы зубьев фрезы, мм; $\alpha_{n0} = \alpha$ – расчётный угол профиля исходной рейки в нормальном сечении, град;

- для фрез с винтовыми канавками

$$\alpha_{\delta n0} = \operatorname{arctg} \left(\frac{r_{a0}}{r_{i0}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \sin \alpha_{n0} \cos \gamma_{i0} \right),$$

где $\gamma_{i0} = \arcsin \left(\frac{k_0 m_{n0}}{d_{i0}} \right)$ – угол подъема витков фрезы на окружности радиуса r_{i0} , град; k_0 – число заходов червячной фрезы; $m_{n0} = m_n$ – нормальный модуль, мм; d_{i0} – диаметр произвольной окружности, не выходящей за пределы зубьев фрезы, мм.

Как видно из формул для определения задних углов на боковых сторонах зубьев в нормальном сечении $\alpha_{\delta n0}$ у фрез с прямыми

и винтовыми стружечными канавками, минимальное значение этих углов будет иметь место, когда $r_{i0} = r_{a0}$. При этом следует также иметь в виду, что минимальное значение α_{6n0} должно быть больше или равно $2^{\circ}30'$ [10]. Если данное условие не выполняется, то будет иметь место интенсивный износ по задней поверхности зубьев фрезы, что в итоге приведет к снижению стойкости инструмента. В этом случае необходимо увеличить значение угла $\alpha_{\text{в}}$ и вновь выполнить проверку.

В проектируемой червячной модульной фрезе стружечные канавки выполняются винтовыми, тогда

$$\begin{aligned} \gamma_{i0} &= \arcsin\left(\frac{k_0 m_{n0}}{d_{i0}}\right) = \arcsin\left(\frac{1 \cdot 2}{65}\right) = 1^{\circ}45'48''; \\ \alpha_{6n0} &= \arctg\left(\frac{r_{a0}}{r_{i0}} \operatorname{tg}\alpha_{\text{в}} \sin\alpha_{n0} \cos\gamma_{i0}\right) = \\ &= \arctg\left(\frac{32,5}{32,5} \cdot \operatorname{tg}10^{\circ} \cdot \sin20^{\circ} \cdot \cos1^{\circ}45'48''\right) = 3^{\circ}26'58''. \end{aligned}$$

8. Выбирается вид исполнения профиля зубьев фрезы. В соответствии со стандартом профиль зубьев фрезы может изготавливаться в двух исполнениях, а именно: без модификации (рис. 2.8) и с модификацией (рис. 2.9) последнего. Модификация профиля осуществляется только для фрез классов точности 4А, 3А, 2А и А. Она в значительной мере облегчает и улучшает процесс последующей чистовой обработки зубчатого венца колес [3], однако несколько усложняет технологический процесс изготовления фрез. Фрезы с модификацией профиля выполняются по заказу потребителя. Размеры профиля зубьев фрез приведены в табл. 2.5.

Для упрощения технологии изготовления выбираем для проектируемой фрезы профиль зубьев без модификации.

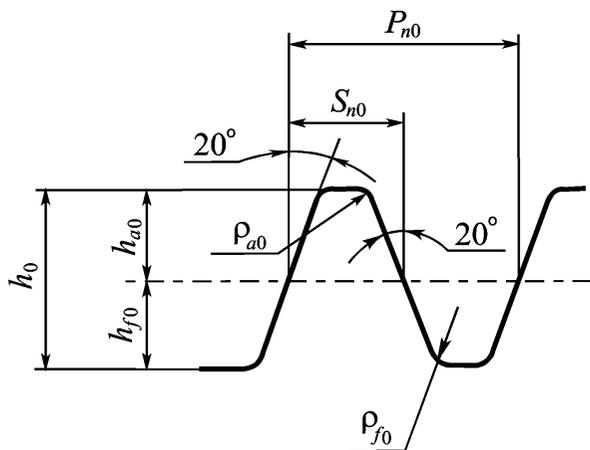


Рис. 2.8. Профиль зубьев червячной модульной фрезы без модификации в нормальном сечении

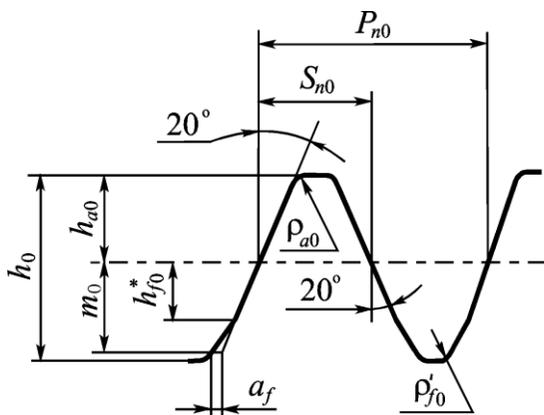


Рис. 2.9. Профиль зубьев червячной модульной фрезы с модификацией в нормальном сечении

Таблица 2.5. Размеры профиля зубьев червячных фрез в нормальном сечении

Модуль m_0 для ряда			P_{n0} , мм	S_{n0} , мм	h_0 , не менее, мм	h_{a0} , мм	h_{f0}^* , не менее, мм
1	2	3					
1			3,142	1,67	2,50	1,25	—
	1,125		3,534	1,87	2,80	1,41	—
1,25			3,927	2,06	3,13	1,56	—
	1,375		4,320	2,26	3,44	1,72	—
1,5			4,712	2,47	3,75	1,88	—
	1,75		5,498	2,86	4,38	2,19	—
2			6,283	3,25	5,00	2,50	1,10
	2,25		7,068	3,64	5,63	2,81	1,24
2,5			7,854	4,07	6,25	3,13	1,37
	2,75		8,639	4,46	6,88	3,44	1,51
3			9,425	4,85	7,50	3,75	1,65
		3,25	10,210	5,25	8,13	4,06	1,79
	3,5		10,996	5,64	8,75	4,38	1,92
		3,75	11,781	6,03	9,38	4,69	2,06
4			12,566	6,45	10,00	5,00	2,20
		4,25	13,352	6,85	10,63	5,31	2,34
	4,5		14,137	7,24	11,25	5,63	2,47
5			15,708	8,02	12,50	6,25	2,75
	5,5		17,279	8,81	13,75	6,88	3,02
6			18,849	9,63	15,00	7,50	3,30
		6,5	20,420	10,41	16,25	8,13	3,57
	7		21,991	11,22	17,50	8,75	3,85
8			25,133	12,79	20,00	10,00	4,40
	9		28,274	14,36	22,50	11,25	4,95
10			31,416	15,93	25,00	12,50	5,50
	11		34,557	17,58	27,50	13,75	6,05
12			37,699	19,15	30,00	15,00	6,60
	14		43,982	22,29	35,00	17,50	7,70
16			50,265	25,43	40,00	20,00	11,20
	18		56,549	28,67	45,00	22,50	12,60
20			62,832	31,82	50,00	25,00	14,00
	22		69,115	34,96	55,00	27,50	15,40
25			74,540	39,67	62,50	31,25	17,50

Модуль m_0 для ряда			ρ_{a0} , мм	ρ_{f0} , мм	ρ'_{f0} , мм	a_f для классов точности	
1	2	3				3А, 2А	А
1			0,38	0,30	–	–	–
	1,125		0,43	0,33	–	–	–
1,25			0,47	0,37	–	–	–
	1,375		0,52	0,41	–	–	–
1,5			0,57	0,45	–	–	–
	1,75		0,66	0,52	–	–	–
2			0,76	0,60	0,40	0,024	0,040
	2,25		0,85	0,67	0,45	0,027	0,045
2,5			0,95	0,75	0,50	0,030	0,050
	2,75		1,05	0,82	0,55	0,033	0,055
3			1,14	0,90	0,60	0,036	0,052
		3,25	1,24	0,97	0,65	0,039	0,057
		3,5	1,33	1,05	0,70	0,042	0,061
		3,75	1,42	1,12	0,75	0,037	0,066
4			1,52	1,20	0,80	0,040	0,060
		4,25	1,62	1,27	0,85	0,042	0,064
		4,5	1,71	1,35	0,90	0,045	0,068
5			1,90	1,50	1,00	0,050	0,075
		5,5	2,09	1,65	1,10	0,049	0,083
6			2,28	1,80	1,20	0,054	0,090
		6,5	2,47	1,95	1,30	0,058	0,078
		7	2,66	2,10	1,40	0,063	0,084
8			3,04	2,40	1,60	0,064	0,096
		9	3,42	2,70	1,80	0,072	0,108
10			3,80	3,00	2,00	0,080	0,120
		11	4,18	3,30	2,20	0,077	0,110
12			4,56	3,60	2,40	0,084	0,120
		14	5,32	4,20	2,80	0,098	0,140
16			6,10	4,80	3,20	0,112	0,160
		18	6,80	5,40	3,60	0,108	0,162
20			7,60	6,00	4,00	0,120	0,180
		22	8,40	6,60	4,40	–	0,198
25			9,50	7,50	5,00	–	0,225

9. Рассчитывается высота головки зуба фрезы. Высота головки зуба h_{a0} (мм), равная расстоянию от наружного до делительного диаметра фрезы, для черновых и получистовых фрез, имеющих $\gamma_{в0} = 0^\circ$, с целью уменьшения припуска на дне впадины колеса и облегчения условий чистового формообразования зубьев увеличена до значения $h_{a0} = 1,3m_{n0}$. Для чистовых червячных модульных фрез с $\gamma_{в0} = 0^\circ$ – $h_{a0} = 1,25m_{n0}$. Что касается фрез с $\gamma_{в0} > 0^\circ$, то высота головки h'_{a0} рассчитывается в плоскости передней грани зуба фрезы (рис. 2.10). Расчёт выполняется по формуле, приведенной в работе [3] и имеющей вид:

$$h'_{a0} = \frac{(d_{a0} - 2h_{a0})\sin(\gamma_m - \gamma_{в0})}{2\sin\gamma_{в0}},$$

где $\gamma_m = \arcsin \frac{2r_\gamma}{(d_{a0} - 2h_{a0})}$, $r_\gamma = \frac{d_{a0}}{2} \sin\gamma_{в0}$.

Тогда применительно к рассчитываемой фрезе:

$$h_{a0} = 1,3m_{n0} = 1,3 \cdot 2 = 2,6 \text{ мм};$$

$$r_\gamma = \frac{d_{a0}}{2} \sin\gamma_{в0} = \frac{65}{2} \sin 5^\circ = 2,833 \text{ мм};$$

$$\gamma_m = \arcsin \frac{2r_\gamma}{(d_{a0} - 2h_{a0})} = \arcsin \frac{2 \cdot 2,833}{(65 - 2 \cdot 2,6)} = 5^\circ 26' 13'';$$

$$\begin{aligned} h'_{a0} &= \frac{(d_{a0} - 2h_{a0})\sin(\gamma_m - \gamma_{в0})}{2\sin\gamma_{в0}} = \\ &= \frac{(65 - 2 \cdot 2,6)\sin(5^\circ 26' 13'' - 5^\circ)}{2\sin 5^\circ} = 2,616 \text{ мм}. \end{aligned}$$

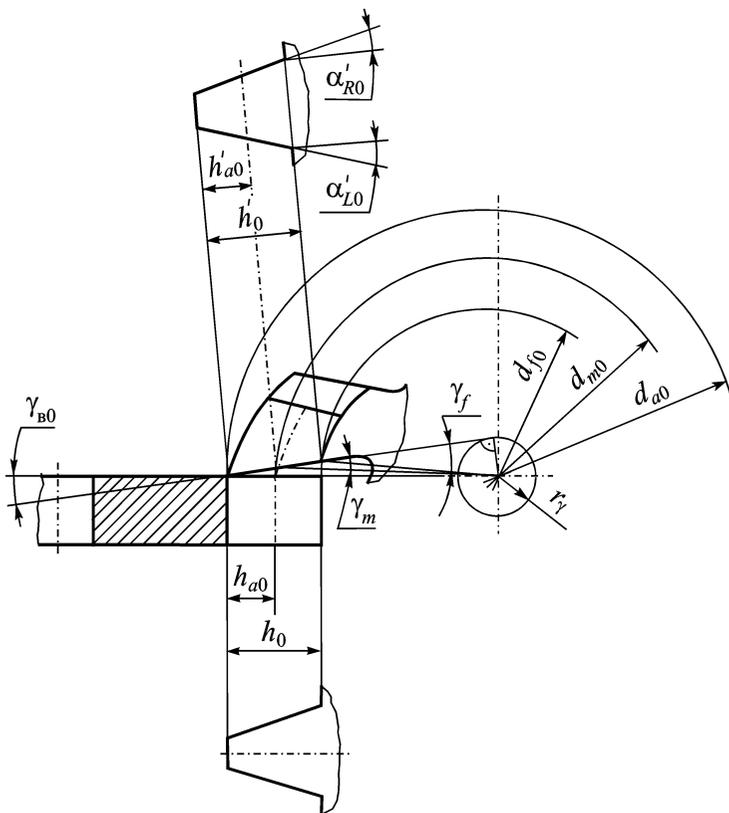


Рис. 2.10. Параметры профиля зуба фрезы при $\gamma_{B0} > 0^\circ$

10. Определяется полная высота профиля зуба фрезы. Для черновых и получистовых фрез со значением переднего угла $\gamma_{B0} = 0^\circ$ полная высота профиля зуба h_0 (мм) рассчитывается по формуле $h_0 = h_{a0} + h_{f0} = 2,55m_{n0}$, где h_{a0} , h_{f0} – соответственно высота головки и ножки зуба, мм. Определение высоты ножки зуба h_{f0} выполняется в п.11. У чистовых червячных модульных фрез

с $\gamma_{в0} = 0^\circ - h_0 = 2,5m_{н0}$. Для определения полной высоты профиля зуба в плоскости его передней поверхности у черновых и получистовых фрез с $\gamma_{в0} > 0^\circ$ следует воспользоваться зависимостью [3]

$$h'_0 = \frac{(d_{a0} - 2h_0)\sin(\gamma_f - \gamma_{в0})}{2\sin\gamma_{в0}}, \quad \text{где } \gamma_f = \arcsin \frac{2r_\gamma}{(d_{a0} - 2h_0)}.$$

Тогда для проектируемой получистой фрезы

$$\begin{aligned} h_0 &= 2,55m_{н0} = 2,55 \cdot 2 = 5,1 \text{ мм}; \\ \gamma_f &= \arcsin \frac{2r_\gamma}{(d_{a0} - 2h_0)} = \frac{2 \cdot 2,833}{65 - 2 \cdot 5,1} = 5^\circ 56' 05''; \\ h'_0 &= \frac{(d_{a0} - 2h_0)\sin(\gamma_f - \gamma_{в0})}{2\sin\gamma_{в0}} = \\ &= \frac{(65 - 2 \cdot 5,1)\sin(5^\circ 56' 05'' - 5^\circ)}{2\sin 5^\circ} = 5,129 \text{ мм}. \end{aligned}$$

11. Рассчитывается высота ножки зуба. Для черновых, получистовых и чистовых фрез с $\gamma_{в0} = 0^\circ$ высота ножки зуба равна $h_{f0} = 1,25m_{н0}$. Для черновых и получистовых фрез с $\gamma_{в0} > 0^\circ$ величина h'_{f0} может быть рассчитана по формуле $h'_{f0} = h'_0 - h'_{a0}$. Следовательно, у проектируемой фрезы величина ножки зуба в плоскости его передней поверхности равна

$$h'_{f0} = h'_0 - h'_{a0} = 5,129 - 2,616 = 2,513 \text{ мм}.$$

12. Определяется число зубьев (стружечных канавок) червячной фрезы. Число зубьев фрезы влияет на количество резов, формирующих эвольвентный профиль зубьев зубчатого колеса, высоту гребешков, образующихся в процессе обработки, и на толщину

стружки, срезаемой каждым зубом. Для снижения шероховатости боковых поверхностей зубьев нарезаемого колеса следует по возможности использовать фрезы с большим числом зубьев.

Предварительно число зубьев у червячных модульных фрез можно рассчитать по формулам:

- для червячных фрез с нешлифованным профилем

$$z'_0 = \frac{360^\circ}{\arccos \frac{(d_{a0} - 2h_0)}{d_{a0}}};$$

- для получистовых и чистовых фрез со шлифованным профилем

$$z'_0 = F \cdot \frac{360^\circ}{\arccos \frac{(d_{a0} - 2h_0)}{d_{a0}}},$$

где F – коэффициент равный 1,2...1,3.

Полученное значение округляется до целого числа. По возможности оно должно соответствовать числу зубьев стандартных фрез (см. табл. 2.1 и 2.2).

Для проектируемой получистовой фрезы

$$z'_0 = F \cdot \frac{360^\circ}{\arccos \frac{(d_{a0} - 2h_0)}{d_{a0}}} = 1,3 \cdot \frac{360^\circ}{\arccos \frac{(65 - 2 \cdot 5,1)}{65}} = 14,385.$$

После округления принимаем z'_0 равным 14 зубьям.

13. Определяется предварительная величина падения затылка (рис. 2.11). У фрез с нешлифованным и шлифованным профилями, т.е. черновых, получистовых и чистовых, величина падения затылка при выбранном значении угла α_B рассчитывается по формуле

$$K' = \frac{\pi d_{a0}}{z'_0} \operatorname{tg} \alpha_B.$$

У фрез со шлифованным профилем для обеспечения выхода шлифовального инструмента (круга) выполняют второе затылование, величина которого равна $K'_1 = (1,2 \dots 1,5)K'$ [3]. При этом полученные значения падений затылка округляются в большую сторону с точностью до 0,5 мм при $m_{n0} \leq 7$ мм и до 1 мм при $m_{n0} > 7$ мм [10].

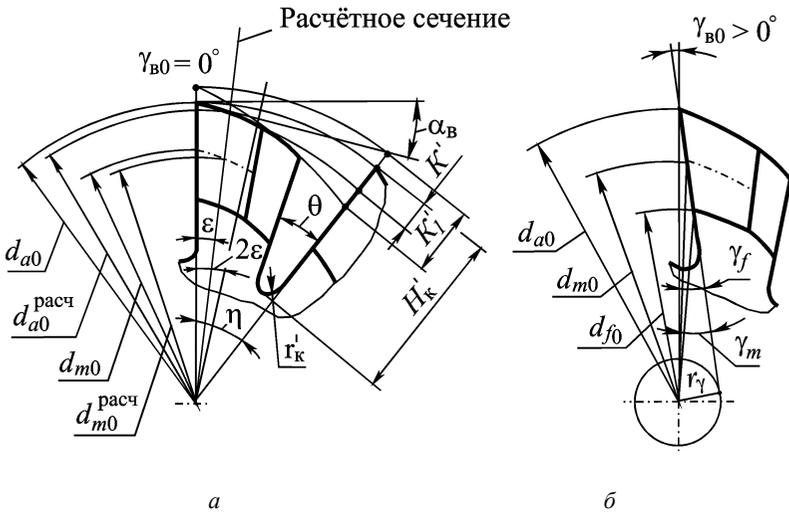


Рис. 2.11. Форма профиля зуба и стружечной канавки, а также их размеры у червячных фрез с торцевой стороны инструмента: а – у чистовых с $\gamma_{B0} = 0^\circ$; б – у полуцистовых и черновых фрез с $\gamma_{B0} > 0^\circ$

Таким образом, у проектируемой фрезы

$$K' = \frac{\pi d_{a0}}{z'_0} \operatorname{tg} \alpha_B = \frac{3,1416 \cdot 65}{14} \operatorname{tg} 10^\circ = 2,572 \approx 3,0 \text{ мм;}$$

$$K'_1 = 1,3K' = 1,3 \cdot 3,0 = 3,9 \approx 4,0 \text{ мм.}$$

14. Рассчитываются параметры стружечной канавки (см. рис. 2.11):

- глубина канавки и радиус закругления дна стружечной канавки [10]:

$$H'_k = h_0 + \frac{(K' + K'_1)}{2} + 1,5; \quad r'_k = \frac{\pi(d_{a0} - 2H'_k)}{10z'_0}.$$

Полученное значение радиуса дна стружечной канавки округляется в большую сторону и принимается кратным 0,5 мм из ряда 0,5; 1; 1,5; 2 мм и т.д.

То есть у проектируемой червячной фрезы эти параметры будут равны

$$H'_k = h_0 + \frac{(K' + K'_1)}{2} + 1,5 = 5,1 + \frac{(3 + 4,0)}{2} + 1,5 = 10,1 \text{ мм};$$

$$r'_k = \frac{\pi(d_{a0} - 2H'_k)}{10z'_0} = \frac{3,1416 \cdot (65 - 2 \cdot 10,1)}{10 \cdot 14} = 1 \text{ мм};$$

- угол профиля стружечной канавки θ (см. рис. 2.11) принимается равным 22° для фрез с $m_{n0} \leq 9$ мм и 25° для фрез с $m_{n0} > 9$ мм. Поэтому, исходя из того, что у проектируемой фрезы $m_{n0} = 2$ мм назначаем $\theta = 22^\circ$.

15. Уточняется прочерчиванием (рис. 2.12) окончательное число зубьев z_0 (стружечных канавок) фрезы на основе использования предварительно найденных параметров K' , K'_1 , H'_k и r'_k , а также найденного значения угла стружечной канавки θ для чего предварительно определяется радиус вспомогательной окружности

$$r_H = \frac{d_{a0}}{2} \sin \alpha_b = \frac{65}{2} \sin 10^\circ = 5,64 \text{ мм}.$$

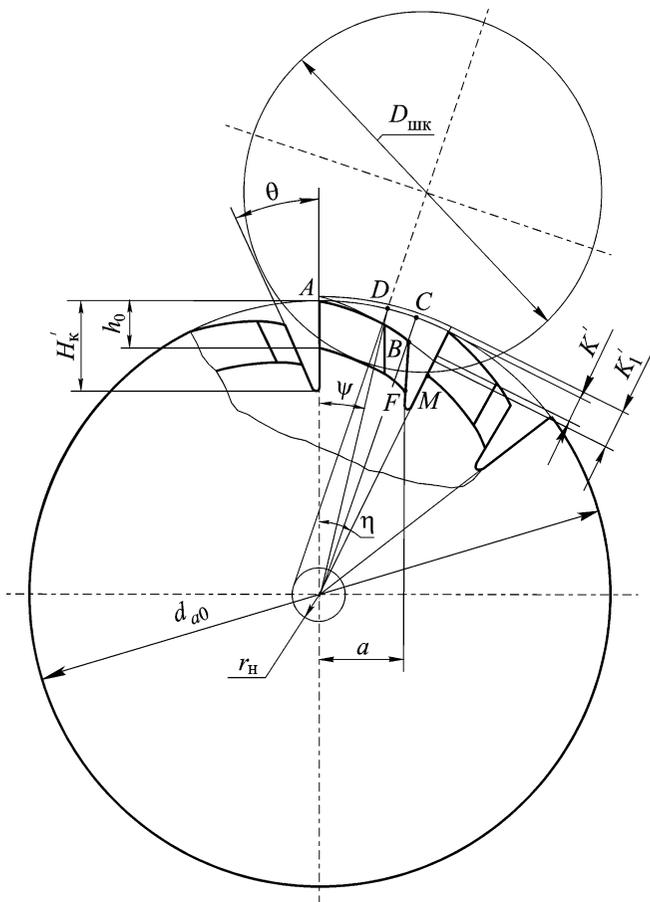


Рис. 2.12. Графическое определение числа зубьев фрезы z_0

Допустимый диаметр абразивного круга для шлифования боковых поверхностей зубьев фрезы следует определять посредством применения формулы [11]

$$D_{\text{шк}} = \frac{0,5d_{a0} \sin(180^\circ / z'_0)}{\sin \alpha_B}.$$

Применительно к проектируемой фрезе

$$D_{\text{шк}} = \frac{0,5d_{a0} \sin(180^\circ / z'_0)}{\sin \alpha_b} = \frac{0,5 \cdot 65 \cdot \sin(180^\circ / 14)}{\sin 10^\circ} = 41,65 \text{ мм.}$$

После выполнения этапа прочерчивания должны выполняться следующие условия (см. рис. 2.12): ширина зуба у основания a должна быть больше или равна $(0,8...1,0)H'_k$; шлифованная часть зубьев фрезы с модулем $m_{n0} \leq 4$ мм должна быть не менее $1/2$ от общей длины зуба по окружности вершин зубьев ($AD \geq 1/2 \cup AC$), а для фрез с модулем $m_{n0} > 4$ мм – не менее $1/3$ длины зуба ($AD \geq 1/3 \cup AC$); при шлифовании профиля зуба абразивный круг не должен задевать последующий зуб, т.е. точка M должна располагаться за пределами окружности диаметра $D_{\text{шк}}$, равной диаметру абразивного инструмента. Если данные условия выполняются, то окончательно назначаются z_0 , K , K_1 , H_k и r_k . В том случае, если условие не выполняется, то изменяется число зубьев z'_0 в меньшую или большую сторону и выполняется повторный расчёт по п.13, 14 и повторное прочерчивание.

Для проектируемой фрезы $z_0 = 14$, $K = 3$ мм, $K_1 = 4$ мм, $H_k = 10,1$ мм, $r_k = 1$ мм, $\theta = 22^\circ$, $a = 9,5$ мм (что составляет $0,94 H_k$).

16. Рассчитывается диаметр отверстия фрезы под оправку по формуле $d = 20 \cdot m_{n0}^{0,373}$. Полученное значение округляется до ближайшего большего, установленного ГОСТ 9472-90 (8, 10, 13, 16, 19, 22, 27, 32, 40, 50, 60, 70, 80, 100 мм).

$$d = 20 \cdot m_{n0}^{0,373} = 20 \cdot 2^{0,373} = 25,90 \text{ мм.}$$

После округления принимаем диаметр отверстия под оправку у проектируемой фрезы равным 27 мм.

17. Определяется диаметр выточки в отверстии

$$d_{\text{в}} = d + 2 = 27 + 2 = 29 \text{ мм.}$$

18. Рассчитывается длина шлифованной части отверстия с каждой стороны фрезы $l_1 = (0,2 \dots 0,3)L$, где L – длина фрезы, мм.

$$l_1 = 0,25 \cdot L = 0,25 \cdot 60 = 15 \text{ мм.}$$

19. Уточняется наружный диаметр новой фрезы d_{a0} . При окончательном назначении d_{a0} учитывается диаметр посадочного отверстия фрезы d , высота стружечной канавки $H_{\text{к}}$ и толщина поперечного сечения тела фрезы, которая во многом будет определять как её прочность, так и жёсткость. Необходимо, чтобы при проектировании фрез было обеспечено выполнение следующего условия [3, 11]

$$d_{a0} \geq d + 2H_{\text{к}} + 2s,$$

где $H_{\text{к}}$ – высота стружечной канавки, мм; $s = (0,25 \dots 0,3)d$ – толщина тела фрезы в опасном сечении, мм.

Применительно к червячным фрезам типа 1 (ГОСТ 9324-2015) данное неравенство примет вид [11]

$$d_{a0} \geq 2H_{\text{к}} + 2s + 2(C_1 - 0,5d),$$

где $C_1 = d + t_2$ (t_2 – глубина шпоночного паза, мм).

Значения размеров t_2 и C_1 выбираются в зависимости от диаметра посадочного отверстия фрезы по ГОСТ 9472-90. На рис. 2.13, а приведена схема осевого шпоночного паза с указанием размеров t_2 и C_1 , а в табл. 2.6 их числовые значения.

В случае проектирования червячной модульной фрезы типа 2 (ГОСТ 9324-2015) геометрические параметры шпоночных пазов (рис. 2.13, б) выбираются из табл. 2.7.

В табл. 2.6 и 2.7 радиусы R и R_1 допускается заменять соответственно фасками, равными $R_{\min} \times 45^\circ$ и $R_1 \times 45^\circ$, а предельные отклонения ширины b шпоночного паза (см. табл. 2.6) должны быть не более С11.

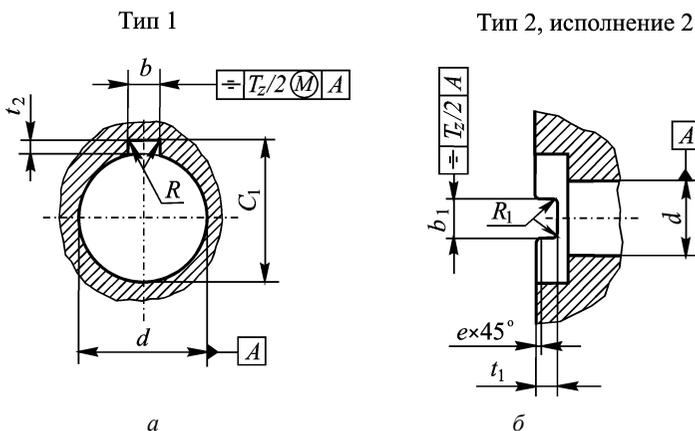


Рис. 2.13. Схемы шпоночных пазов у червячных фрез по ГОСТ 9374-2015: а – осевого у фрез типа 1; б – торцевого у фрез типа 2

Таблица 2.6. Размеры шпоночного паза в посадочном отверстии фрезы при креплении инструмента на оправке по типу 1 (ГОСТ 9472-90) [16]

Размеры и поля допусков	d (поля допусков H7 или H6), мм						
	8	10	13	16	19	22	27
b , мм	2	3	4	5	6	7	
C_1 H12, мм	8,9	11,5	14,6	17,7	21,1	24,1	29,8
t_2 , мм	0,9	1,5	1,6	1,7	2,1	2,1	2,8
R_{\min} , мм	0,3		0,4		0,7		0,9
R_{\max} , мм	0,4		0,6		1,0		1,2
$T_z/2$, мм [3]	0,07					0,09	

Окончание табл. 2.6

Размеры и поля допусков	<i>d</i> (поля допусков <i>H7</i> или <i>H6</i>), мм						
	32	40	50	60	70	80	100
<i>b</i> , мм	8	10	12	14	16	18	25
<i>C₁ H12</i> , мм	34,8	43,5	53,5	64,2	75,0	85,5	107,0
<i>t₂</i> , мм	2,8	3,5		4,2	5,0	5,5	7,0
<i>R_{min}</i> , мм	0,9		1,1		1,5		2,0
<i>R_{max}</i> , мм	1,2		1,6		2,0		2,5
<i>T_z/2</i> , мм [3]	0,09			0,12			

Таблица 2.7. Размеры шпоночных пазов на торцах червячной фрезы при креплении инструмента на оправке по типу 2, исполнение 2 (ГОСТ 9472-90) [16]

Размеры и поля допусков	<i>d</i> (поля допусков <i>H7</i> или <i>H6</i>), мм						
	8	10	13	16	19	22	27
<i>b₁ H11</i> , мм	5,4	6,4	8,4		10,4		12,4
<i>t₁ H13</i> , мм	4,0	4,5	5,0	5,6	6,3		7,0
<i>R_l</i> не более, мм	0,6	0,8	1,0		1,2		
<i>e_{min}</i> , мм	0,4	0,5		0,6			0,8
<i>e_{max}</i> , мм	0,5	0,6		0,8			1,0
<i>T_z/2</i> , мм	0,2						

Окончание табл. 2.7

Размеры и поля допусков	<i>d</i> (поля допусков <i>H7</i> или <i>H6</i>), мм						
	32	40	50	60	70	80	100
<i>b₁ H11</i> , мм	14,4	16,4	18,4	20,5	22,5	25,5	
<i>t₁ H13</i> , мм	8,0	9,0	10,0	11,2	12,5	14,0	16,0
<i>R_l</i> не более, мм	1,6	2,0			3,0		
<i>e_{min}</i> , мм	0,8	1,0			1,2		1,6
<i>e_{max}</i> , мм	1,0	1,3			1,5		1,9
<i>T_z/2</i> , мм	0,2			0,25			

Если учесть, что на этапе конструирования инструмента (п.1) был выбран тип фрезы 1 и вид исполнения 2, то

$$s = 0,25d = 0,25 \cdot 27 = 6,75 \text{ мм};$$

$$d_{a0} \geq 2H_k + 2s + 2(C_1 - 0,5d) =$$

$$= 2 \cdot 10,1 + 2 \cdot 6,75 + 2(29,8 - 0,5 \cdot 27) = 66,3 \text{ мм}.$$

Предварительно наружный диаметр фрезы был выбран равным 65 мм, т.е. условие прочности и жёсткости не выполняется. Для выполнения данного условия, во-первых, можно изменить конструктивное исполнение фрезы с типа 1 на тип 2, во-вторых, назначить больший наружный диаметр фрезы, не соответствующий указанному в табл. 2.2, в-третьих, уменьшить угол α_b , что приведёт к уменьшению величины K , и, в-четвертых, уменьшить значение K_1 . Первое мероприятие не приведет к повторному расчету, а три последующих потребуют его осуществления.

Для проектируемой фрезы изменим конструктивное исполнение с типа 1 на тип 2 при виде исполнения 2, тогда

$$d_{a0} \geq d + 2H_k + 2s = 27 + 2 \cdot 10,1 + 2 \cdot 6,75 = 60,2 \text{ мм}.$$

В этом случае условие прочности выполняется: 65 мм > 60,2 мм. Поэтому окончательное значение наружного диаметра для проектируемой фрезы будет равно 65 мм.

20. Посредством расчёта определяется длина инструмента L для фрез типа 1 либо параметр L для фрез типа 2 (см. рис. 2.6) по формуле [4], учитывающей число осевых передвижек x , назначаемых в зависимости от модуля фрезы по табл. 2.8.

$$L = l_p + 2l = 2h_{a0} \operatorname{ctg} \alpha_{n0} + \pi x m_{n0} + 2l,$$

где l_p – рабочая часть фрезы, мм; l – длина буртика, мм (для фрез исполнения 1 $l = 1 \dots 2$ мм, а для фрез исполнения 2 $l = 4 \dots 6$ мм).

Таблица 2.8. Количество осевых передвижек фрезы в зависимости от модуля [4]

m_{n0} , мм	1...2	2,5...4,5	5,5...15	16...24
x	13...7	5,5...3,5	3...2	1,8...1,4

Тогда для проектируемой фрезы

$$L = l_p + 2l = 2h_{a0} \operatorname{ctg} \alpha_{n0} + \pi x m_{n0} + 2l = \\ = 2 \cdot 2,6 \cdot \operatorname{ctg} 20^\circ + 3,1416 \cdot 7 \cdot 2 + 2 \cdot 4 = 66,27 \approx 65 \text{ мм.}$$

При нарезание зубчатых колес, имеющих большое число зубьев или косозубых зубчатых колес с углом наклона винтовой линии зуба более 20° , на рабочей части фрезы формируют заборный конус величиной $\varphi_k = 7...10^\circ$, для равномерного распределения срезаемого припуска между зубьями.

21. Определяется диаметр буртиков фрезы (см. рис. 2.6).

$$d_1 = d_{a0} - 2H_k - (1...2) = 65 - 2 \cdot 10,1 - 2 = 42,8 \text{ мм} \approx 43 \text{ мм.}$$

22. Рассчитывается длина инструмента для фрез типа 2 на основе зависимости $L_1 = L + 2l_2$, где l_2 – расстояние от торца буртика до торца фрезы (см. рис. 2.6), мм (назначается по табл. 2.9).

Таблица 2.9. Значение параметра l_2 в зависимости от модуля

Исполнение 1				
m_{n0} , мм	0,5...1	1,125...2	-	-
l_2 , мм	0 или 5	5	-	-
Исполнение 2				
m_{n0} , мм	1...7	8...14	16...25	28...40
l_2 , мм	7,5	10	12,5	15

Так как проектируемая фреза соответствует типу 2, то

$$L_1 = L + 2l_2 = 65 + 2 \cdot 7,5 = 80 \text{ мм.}$$

23. Определяются диаметры начального (делительного) цилиндра у новой фрезы d_{m0} и в расчётном сечении $d_{m0}^{\text{расч}}$. Начальный диаметр является исходной величиной для расчёта основных параметров червячной модульной фрезы. После каждой переточки фрезы, осуществляемой по передней поверхности затылованных зубьев, из-за наличия задних углов её диаметр уменьшается, что приводит как к увеличению угла подъёма витков червяка γ_{m0} на делительном цилиндре диаметром d_{m0} , так и увеличению осевого шага фрезы. А это, в свою очередь, приводит к появлению дополнительной погрешности при нарезании зубчатых колес.

С учётом ранее изложенного для снижения погрешности изготовления зубчатых колес примерно в 2 раза основные параметры червячной фрезы определяют в расчётном сечении, отстоящем от передней поверхности зуба фрезы на расстоянии $\varepsilon = (0,1 \dots 0,25)\eta$, где $\eta = 2\pi/z_0$ – угловой шаг зубьев фрезы в торцовом сечении (рис. 2.11, а).

Тогда диаметры делительного цилиндра (рис. 2.11) будут определяться по формулам:

- у новой фрезы (в начальном сечении)

$$d_{m0} = d_{a0} - 2h_{a0};$$

- в расчётном сечении:

для фрез с нешлифованным профилем (черновых) [11]

$$d_{m0}^{\text{расч}} = d_{a0} - 2h_{a0} - 0,5K;$$

для фрез со шлифованным профилем (получистовых и чистовых)

$$d_{m0}^{\text{расч}} = d_{a0} - 2h_{a0} - (0,2\dots0,3)K .$$

Используя данные зависимости, рассчитаем эти параметры для проектируемой фрезы

$$d_{m0} = d_{a0} - 2h_{a0} = 65 - 2 \cdot 2,6 = 59,8 \text{ мм};$$

$$d_{m0}^{\text{расч}} = d_{a0} - 2h_{a0} - 0,25K = 65 - 2 \cdot 2,6 - 0,25 \cdot 3 = 59,05 \text{ мм}.$$

24. Рассчитываются величины нормального шага зубьев фрезы P_{n0} (рис. 2.8 и 2.9) и хода витков фрезы P_{zn} (если $k_0 > 1$) в нормальном сечении.

Величина нормального шага рассчитывается на основе зависимости

$$P_{n0} = \pi m_{n0} = 3,1416 \cdot 2 = 6,283 \text{ мм},$$

а величина хода витков в нормальном сечении по формуле

$$P_{zn} = \pi m_{n0} k_0 .$$

Если число заходов фрезы $k_0 = 1$, то нормальный шаг равен ходу витков фрезы в нормальном сечении.

Обоснование выбора числа заходов у проектируемой фрезы, равное 1, представлено в п. 5.

25. Определяется толщина зуба фрезы в нормальном сечении S_{n0} . Расчётная толщина зуба в нормальном сечении на делительной прямой равна:

- для чистовых фрез

$$S_{n0} = P_{n0} - S_n ;$$

- для получистовых и черновых фрез

$$S_{n0} = P_{n0} - (S_n + \Delta S_{n.обр}),$$

где $S_n = \frac{\pi m_{n0}}{2} - E_{cs}$ – толщина зуба нарезаемого колеса по дуге делительной окружности с учетом обеспечения требуемого вида сопряжения в передаче, мм; E_{cs} – наименьшее отклонение толщины зуба зубчатых колес с внешними и внутренними венцами, необходимое для получения заданной величины бокового зазора в передаче, мм; $\Delta S_{n.обр}$ – припуск под последующую чистовую обработку, мм.

Параметры, характеризующие нормы бокового зазора в передаче в зависимости от вида сопряжения, степени точности колес по нормам плавности и величины делительного диаметра зубчатого венца приведены в табл. 2.10 и ГОСТ 1643-81 [13], а припуск под последующую чистовую обработку в табл. 2.11 и 2.12. Следует отметить, что для чистовых червячных модульных фрез величина $\Delta S_{n.обр} = 0$.

Для изготовления зубчатого колеса 7-ой степени точности с видом сопряжения В (рис. 1.4) и делительным диаметром 132 мм величина S_n должна составлять

$$S_n = \frac{\pi m_{n0}}{2} - E_{cs} = \frac{3,1416 \cdot 2}{2} - 0,140 = 3,002 \text{ мм.}$$

Тогда у проектируемой червячной модульной фрезы для чистовой обработки

$$S_{n0} = P_{n0} - (S_n + \Delta S_{n.обр}) = 6,283 - (3,002 + 0,2) = 3,081 \text{ мм.}$$

26. Определяется величина угла подъема витков фрезы по начальному делительному цилиндру у новой фрезы и в расчётном сечении

$$\gamma_{m0} = \arcsin\left(\frac{k_0 m_{n0}}{d_{m0}}\right); \quad \gamma_{m0}^{\text{расч}} = \arcsin\left(\frac{k_0 m_{n0}}{d_{m0}^{\text{расч}}}\right).$$

Расчет производится с точностью до 1".

Таблица 2.10. Нормы бокового зазора (показатель E_{cs}) по ГОСТ 1643-81 [13]

Вид сопряжения	Степень точности по нормам плавности	Делительный диаметр d , мм								
		До 80	Св. 80 до 125	Св. 125 до 180	Св. 180 до 250	Св. 250 до 315	Св. 315 до 400	Св. 400 до 500	Св. 500 до 630	Св. 630 до 800
		МКМ								
H	3-6	9	10	12	14	16	16	18	20	22
	7	10	12	14	14	16	18	20	22	25
E	3-6	22	25	30	35	40	40	45	50	60
	7	25	30	35	35	40	45	50	60	70
D	3-6	35	40	45	55	60	60	70	80	90
	7	35	45	50	60	70	70	80	90	100
	8	40	50	60	70	70	80	90	100	120
C	3-6	55	60	70	80	90	100	110	120	140
	7	60	70	80	90	100	120	140	140	160
	8	70	80	90	100	120	140	140	160	180
	9	70	90	100	120	140	140	140	180	200
B	3-6	90	100	120	140	160	160	180	200	220
	7	100	120	140	140	180	180	200	220	250
	8	100	120	140	160	180	200	220	250	300
	9	120	140	160	180	200	220	250	300	300
	10	120	140	180	180	220	250	250	300	350
	11	140	160	180	200	220	250	300	300	350
A	3-6	140	160	180	200	250	250	300	300	350
	7	150	180	200	220	250	300	350	350	400
	8	160	200	220	250	300	350	350	400	450
	9	180	200	250	300	300	350	350	450	500
	10	200	220	250	300	350	350	450	450	500
	11	200	240	300	350	350	400	450	500	600
	12	220	250	350	350	350	450	500	500	600

Вид сопряжения	Степень точности по нормам плавности	Делительный диаметр d , мм								
		Св. 800 До 1000	Св. 1000 до 1250	Св. 1250 до 1600	Св. 1600 до 2000	Св. 2000 до 2500	Св. 2500 до 3150	Св. 3150 до 4000	Св. 4000 до 5000	Св. 5000 до 6300
		мкм								
H	3-6	30	35	35	45	50	60	70	90	120
	7	35	35	40	50	60	70	80	100	140
E	3-6	70	80	90	110	120	160	180	240	300
	7	70	90	100	120	140	180	200	250	350
D	3-6	100	120	140	180	200	240	300	350	450
	7	120	140	160	180	220	250	350	400	500
	8	140	140	180	200	250	300	350	450	550
C	3-6	160	180	220	250	300	400	500	600	700
	7	180	200	250	300	350	450	500	700	800
	8	200	220	300	350	400	500	600	700	900
	9	220	250	350	350	450	500	600	700	900
B	3-6	250	300	350	400	500	600	800	900	1100
	7	300	350	400	500	600	700	800	1000	1400
	8	350	350	450	500	600	700	900	1200	1400
	9	350	400	500	600	700	800	1000	1400	1400
	10	400	450	500	600	700	900	1000	1400	1600
	11	400	450	600	800	900	900	1200	1400	1800
A	3-6	400	500	600	700	800	1000	1200	1400	1800
	7	450	500	700	700	900	1000	1400	1600	2000
	8	500	600	700	800	1000	1200	1400	1800	2200
	9	600	700	700	900	1000	1400	1600	1800	2500
	10	600	700	800	1000	1200	1400	1600	2000	2500
	11	700	700	900	1000	1200	1400	1800	2200	3000
	12	700	800	900	1200	1400	1600	2000	2500	3000

Примечание. E_{cs} – наименьшее отклонение толщины зуба для зубчатых колес с внешними и внутренними зубьями

Таблица 2.11. Припуск на толщину зуба под чистовое фрезерование зубчатых колёс [11]

m_{n0} , мм	2...4	4...6	6...8	8...10	10...14	14...20
$\Delta S_{n.обр}$, мм	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5

Таблица 2.12. Припуск (мм) на толщину зуба под шевингование и шлифование зубчатых колёс [11]

Шевингование						
Модуль, мм	Диаметр зубчатого колеса, мм					
	До 80		80...100		100...200	
1,0...3,0	0,06...0,08		0,08...0,10		0,12...0,15	
3,0...5,0	0,08...0,10		0,10...0,12		0,15...0,18	
5,0...8,0	–		0,12...0,18		0,20...0,28	
Шлифование						
Модуль, мм	Диаметр зубчатого колеса, мм					
	50...100	100...200	200...300	300...400	400...500	500...600
До 2,5	0,10...0,18	0,15...0,20	0,18...0,24	0,20...0,25	0,20...0,30	0,24...0,32
2,5...6,0	0,15...0,20	0,17...0,22	0,20...0,25	0,22...0,28	0,27...0,32	0,25...0,36
6,0...8,0	0,16...0,22	0,18...0,24	0,24...0,28	0,23...0,34	0,25...0,34	0,27...0,39

В этом случае у проектируемой червячной модульной фрезы значение угла γ_{m0} и $\gamma_{m0}^{расч}$ будет равно

$$\gamma_{m0} = \arcsin\left(\frac{k_0 m_{n0}}{d_{m0}}\right) = \arcsin\left(\frac{1 \cdot 2}{59,8}\right) = 1^\circ 55' 00'';$$

$$\gamma_{m0}^{расч} = \arcsin\left(\frac{k_0 m_{n0}}{d_{m0}^{расч}}\right) = \arcsin\left(\frac{1 \cdot 2}{59,05}\right) = 1^\circ 56' 27''.$$

Червячные фрезы с углом подъёма витка $\gamma_{m0} \leq 6^\circ$ могут быть изготовлены с прямыми осевыми $\lambda_{m0} = 0^\circ$ или винтовыми

$\lambda_{m0} = \gamma_{m0}$ стружечными канавками, которые нарезают нормально к виткам червяка.

27. Рассчитываются значения осевого шага P_{x0} и осевого хода P_{zx} (если $k_0 > 1$) витков фрезы.

Величины осевого шага и хода определяются по формулам:

$$P_{x0} = \frac{P_{n0}}{\cos \gamma_{m0}} = \frac{6,283}{\cos 1^\circ 55' 00''} = 6,287 \text{ мм};$$

$$P_{zx} = \frac{P_{zn}}{\cos \gamma_{m0}} = \frac{\pi m_{n0} k_0}{\cos \gamma_{m0}}.$$

Если число заходов фрезы $k_0 = 1$, то осевой шаг равен осевому ходу витков фрезы.

28. Определяется толщина зуба фрезы в осевом сечении. Расчет толщины зуба в осевом сечении выполняется по формулам:

- для чистовых фрез

$$S_{x0} = \frac{(P_{n0} - S_n)}{\cos \gamma_{m0}};$$

- для получистовых и черновых фрез

$$S_{x0} = \frac{(P_{n0} - S_n)}{\cos \gamma_{m0}} - \Delta S_{n.обр}.$$

Воспользовавшись зависимостью для получистовых и черновых фрез, рассчитаем S_{x0} для проектируемой получистовой фрезы

$$S_{x0} = \frac{(P_{n0} - S_n)}{\cos \gamma_{m0}} - \Delta S_{n.обр} = \frac{(6,283 - 3,002)}{\cos 1^\circ 55' 00''} - 0,2 = 3,083 \text{ мм}.$$

29. На основании расчёта определяются радиусы закругления вершин и впадин зубьев фрезы (рис. 2.8 и 2.9). Расчёт выполняют посредством использования следующих зависимостей с точностью до 0,01 мм:

- для вершин зубьев $\rho_{a0} = 0,38m_{n0}$;

- для впадин зубьев $\rho_{f0} = 0,3m_{n0}$.

Параметры ρ_{a0} , ρ_{f0} , а также параметры h_{f0}^* , ρ'_{f0} и a_f (для фрез с модификацией профиля зубьев в нормальном сечении, рис. 2.9) можно также назначить, используя табл. 2.5.

30. Определяются направление, угол наклона и величина хода винтовых стружечных канавок. Как следует из работ [3, 4, 6], направления червячной нарезки и винтовых стружечных канавок не имеют значения при нарезании прямозубых колес, поэтому фрезы для них обычно выполняют правозаходными. При изготовлении зубчатых колёс с правым направлением зубьев применяют правозаходные фрезы, а для колес с левым направлением зубьев – левозаходные фрезы.

При $\lambda_{m0} = \gamma_{m0}$ ход винтовых стружечных канавок определяется по формуле $P_z = \pi d_{m0} \operatorname{ctg} \lambda_{m0}$. Следует отметить, что для прямых – осевых стружечных канавок этот параметр не рассчитывается.

Проектируемая фреза предназначена для нарезания прямозубых колес, поэтому её выполняем правозаходной с ходом винтовой стружечной канавки равной

$$P_z = \pi d_{m0} \operatorname{ctg} \lambda_{m0} = 3,1416 \cdot 59,8 \cdot \operatorname{ctg} 1^\circ 55' 00'' = 5614 \text{ мм.}$$

31. Расчёт углов профиля исходного контура инструментальной рейки (углов профиля зуба). Расчет либо назначение углов профиля зуба зависит от вида червяка, используемого при проектировании фрезы и её назначения.

Для чистовых червячных фрез, выполненных на основе архимедова червяка, расчёт углов правой и левой сторон профиля осуществляется по формулам:

- для левой стороны профиля

$$\alpha_{xR0} = \operatorname{arcctg} \left(\operatorname{ctg} \alpha_{x0} \pm \frac{Kz_0}{P_z} \right);$$

- для правой стороны профиля

$$\alpha_{xR0} = \operatorname{arcctg} \left(\operatorname{ctg} \alpha_{x0} \mp \frac{Kz_0}{P_z} \right),$$

где $\operatorname{ctg} \alpha_{x0} \approx \operatorname{ctg} \alpha \cos \gamma_{m0}$; α_{x0} – угол исходного профиля в осевом сечении фрезы, град; K – величина падения затылка, мм; z_0 – число зубьев фрезы; верхний знак в представленных формулах предназначен для правозаходных фрез, а левый – для левозаходных.

У черновых и получистовых фрез, созданных на основе конволютного червяка, углы профиля зуба в нормальном сечении для левой и правой сторон принимают одинаковыми и равными $\alpha_{n0} = 20^\circ$. Однако для повышения точности обработки зубчатых колес фрезами, имеющими $\gamma_{m0} \geq 3^\circ$, рекомендуется увеличить значения левой и правой сторон профиля на величины, приведенные в табл. 2.13. Для конволютных червячных фрез показывают линейные и угловые параметры профиля в нормальном сечении к виткам, а для архимедовых червячных фрез с винтовыми стружечными канавками показывают два сечения – нормальное и осевое.

Учитывая, что у проектируемой фрезы, выполненной на базе конволютного червяка, величина угла подъема витка составляет $\gamma_{m0} = 1^\circ 55' 00''$ и, следовательно, меньше 3° поправка на углы профиля для правой и левых сторон не производится.

Таблица 2.13. Поправка $\Delta\alpha$ на величину угла профиля у червячных модульных фрез, спроектированных на базе конволютных червяков при $\gamma_{m0} \geq 3^\circ$ [3]

$\gamma_{m0}^{\text{расч}}$	3°	4°	5°	6°	7°
$\Delta\alpha$	$1'$	$1'30''$	$2'30''$	$4'$	$6'$

При изготовлении получистовых и черновых фрез с положительным передним углом последний оказывает влияние на левый и правый углы профиля в плоскости передней поверхности. Величины их могут быть определены по формулам, приведенным в работе [6], в которых верхние знаки относятся к правозаходным фрезам, нижние – к левозаходным (рис. 2.10)

$$\alpha'_{L0} = \operatorname{arctg} \left(\frac{h_0 \frac{\operatorname{tg}\alpha_{n0} \pm \Delta_\gamma}{\cos\gamma_{m0}}}{h'_0} \right);$$

$$\alpha'_{R0} = \operatorname{arctg} \left(\frac{h_0 \frac{\operatorname{tg}\alpha_{n0} \mp \Delta_\gamma}{\cos\gamma_{m0}}}{h'_0} \right),$$

где $\Delta_\gamma = \frac{P_{zx}(\gamma_f - \gamma_{в0})}{360^\circ}$ – максимальное линейное искажение профиля зуба фрезы, возникающее из-за наличия переднего угла, мм; h_0 – полная высота профиля зуба, мм; h'_0 – высота профиля зуба в плоскости передней поверхности, мм.

Исходя из ранее изложенного материала, определим Δ_γ , α'_{L0} , α'_{R0} для проектируемой правозаходной получистовой фрезы. Необходимые для расчёта параметры h_0 , h'_0 и γ_{m0} были определены соответственно в п. 10 и в п. 26.

Тогда

$$\Delta_\gamma = \frac{P_{zx}(\gamma_f - \gamma_{B0})}{360^\circ} = \frac{6,287 \cdot (5^\circ 56' 05'' - 5^\circ)}{360^\circ} = 0,016 \text{ мм};$$

$$\alpha'_{L0} = \operatorname{arctg} \left(\frac{h_0 \frac{\operatorname{tg} \alpha_{n0}}{\cos \gamma_{m0}} + \Delta_\gamma}{h'_0} \right) =$$

$$= \operatorname{arctg} \left(\frac{5,1 \cdot \frac{\operatorname{tg} 20^\circ}{\cos 1^\circ 55' 00''} + 0,016}{5,129} \right) = 20^\circ 03' 50'' \approx 20^\circ 04'.$$

$$\alpha'_{R0} = \operatorname{arctg} \left(\frac{h_0 \frac{\operatorname{tg} \alpha_{n0}}{\cos \gamma_{m0}} - \Delta_\gamma}{h'_0} \right) =$$

$$= \operatorname{arctg} \left(\frac{5,1 \cdot \frac{\operatorname{tg} 20^\circ}{\cos 1^\circ 55' 00''} - 0,016}{5,129} \right) = 19^\circ 44' 52'' \approx 19^\circ 45'.$$

32. Все остальные элементы червячной модульной фрезы, необходимые для выполнения её 3D-модели и рабочего чертежа, назначаются из конструктивных соображений и опыта проектирования инструмента, а диаметр буртика фрез d_1 (см. рис. 2.6) назначается по согласованию с изготовителем.

На торцах червячной модульной фрезы наносят маркировку, которая позволяет рабочему (оператору) обеспечить её правильную установку на зубофрезерном станке и надлежащие условия

эксплуатации. Маркировка на инструменте выполняется в соответствии с ГОСТ 9324-2015 [15] и должна содержать:

- товарный знак предприятия-изготовителя;
- модуль;
- угол профиля;
- обозначение класса точности;
- угол подъема витка;
- ход винтовой стружечной канавки;
- букву «Л» – для левозаходных фрез;
- марку инструментальной стали.

33. Червячные модульные фрезы должны удовлетворять техническим требованиям, регламентируемым ГОСТ 9324-2015.

33.1. Твердость цельных червячных модульных фрез, изготовленных из быстрорежущих сталей по ГОСТ 19265-73 [17], а также гребенок из этих же сталей, закрепленных в корпусе составных и сборных фрез, не должна быть меньше 63...65 HRC. Твердость же фрез и гребенок из быстрорежущих сталей с содержанием ванадия и кобальта соответственно равным 3 и 5% и более должна быть выше на 1...2 единицы HRC.

33.2. На всех поверхностях фрез недопустимо наличие трещин и следов коррозии, а на шлифованных поверхностях не должно быть прижогов, выкрошенных мест и забоин.

33.3. Поля допусков диаметров посадочных отверстий фрез должны соответствовать значениям табл. 2.14.

33.4. Параметры шероховатости, установленные ГОСТ 2789-73, не должны превышать значений, указанных в табл. 2.15.

32.5. Критерием затупления фрез является допустимый износ по задней поверхности зубьев, величина которого не должна превышать значений, указанных в табл. 2.16

32.6. Допуски и предельные отклонения контролируемых параметров должны соответствовать значениям, указанным в табл. 2.17 [15].

Таблица 2.14. Поля допусков диаметров посадочных отверстий

Класс точности фрезы	Поле допуска для посадочного отверстия диаметром, мм									
	8	10	13	22	27	32	40	50	60	80
4А	Н3									
3А	Н3			Н4						
2А										
А	Н4			Н5						
В	Н5									
С	Н6									
Д										

Таблица 2.15. Параметры шероховатости контролируемых поверхностей червячных фрез

Наименование поверхности	Параметр шероховатости поверхности (мкм) в зависимости от модуля фрезы (мм)							
	От 0,5 до 0,9	Св. 0,9 до 3,5	Св. 3,5 до 10	Св. 10	От 0,5 до 0,9	Св. 0,9 до 3,5	Св. 3,5 до 10	Св. 10
	Класс точности фрез							
	4А, 3А, 2А				А			
Посадочное отверстие, R_a	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Передняя поверхность, R_z	1,6	1,6	1,6	1,6	3,2	3,2	3,2	3,2
Задняя боковая поверхность зуба, R_z	1,6	1,6	1,6	3,2	1,6	1,6	1,6	3,2
Задняя поверхность по вершине зуба, R_z	1,6	1,6	1,6	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Цилиндрическая поверхность буртика, R_z	1,6	1,6	1,6	3,2	1,6	1,6	1,6	3,2
Торец буртика, R_a	0,2	0,4	0,4	0,8	0,4	0,4	0,4	0,8

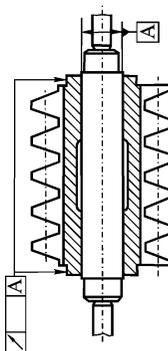
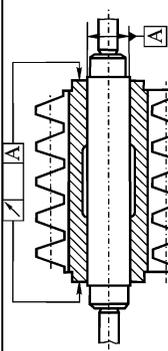
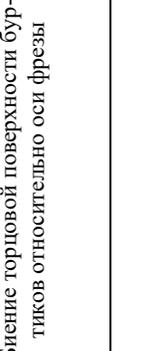
Наименование поверхности	Параметр шероховатости поверхности (мкм) в зависимости от модуля фрезы (мм)							
	От 0,5 до 0,9	Св. 0,9 до 3,5	Св. 3,5 до 10	Св. 10	От 0,5 до 0,9	Св. 0,9 до 3,5	Св. 3,5 до 10	Св. 10
	Класс точности фрез							
	В				С, D			
Посадочное отверстие, Ra	0,4	0,4	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,6
Передняя поверхность, Rz	3,2	3,2	3,2	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Задняя боковая поверхность зуба, Rz	3,2	3,2	3,2	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Задняя поверхность по вершине зуба, Rz	3,2	3,2	3,2	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Цилиндрическая поверхность буртика, Rz	3,2	3,2	3,2	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Торец буртика, Ra	0,4	0,8	0,8	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6

Таблица 2.16. Допустимый износ фрез по задней поверхности зубьев

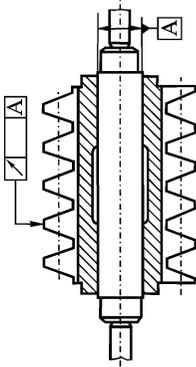
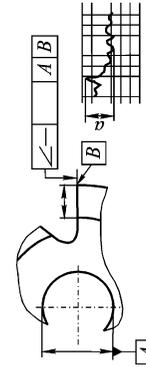
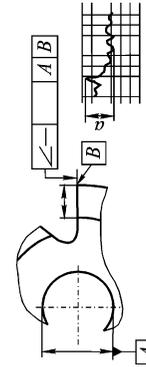
Модуль, мм	Допустимый износ, мм
От 0,5 до 1	0,25
Св. 1 до 10	0,30
Св. 10 до 14	0,50
Св. 14	0,60

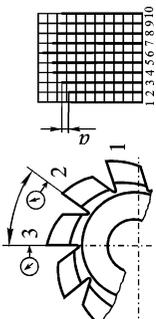
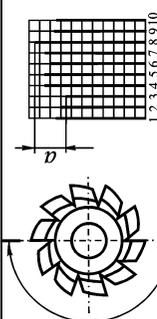
33.7. Шлифованная часть зубьев фрез, обеспечивающая требуемую точность профиля инструмента, должна быть не менее $1/2$ длины зуба, считая по окружности вершин зубьев – для фрез модулей до 4 мм включительно, и $1/3$ – для фрез модулей свыше 4 мм.

Таблица 2.17. Допуски и предельные отклонения контролируемых параметров

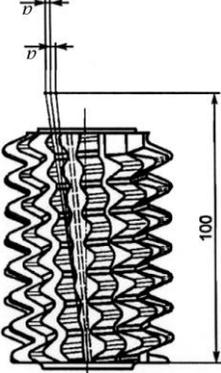
Номер измерения	Схема контроля	Контролируемый параметр	Диапазон модулей, мм	Допуск и предельное отклонение (мкм) для класса точности					
				4A	3A	2A	A	B	C
1	 <p>Радиальное биение буртиков</p>	От 0,5 до 1	2	2	3	4	7	9	
		Св. 1 до 2	2	2	3	4	7	9	
		Св. 2 до 3,5	2	3	4	6	9	12	
		Св. 3,5 до 6	2	3	5	7	11	15	
		Св. 6 до 10	3	4	6	9	14	18	
		Св. 10 до 16	4	5	8	11	17	23	
		Св. 16 до 25	5	7	10	14	22	28	
2	 <p>Радиальное биение буртиков относительно оси фрезы</p>	От 0,5 до 1	2	2	3	4	6	8	
		Св. 1 до 2	2	2	3	4	6	8	
		Св. 2 до 3,5	2	2	3	5	7	10	
		Св. 3,5 до 6	2	3	4	6	9	12	
		Св. 6 до 10	3	4	5	7	12	15	
		Св. 10 до 16	3	5	6	9	14	19	
		Св. 16 до 25	4	6	8	11	18	24	
Св. 25 до 40	5	7	11	15	24	31			
	 <p>Биение торцевой поверхности буртиков относительно оси фрезы</p>	От 0,5 до 1	2	2	3	4	6	8	
		Св. 1 до 2	2	2	3	4	6	8	
		Св. 2 до 3,5	2	2	3	5	7	10	
		Св. 3,5 до 6	2	3	4	6	9	12	
		Св. 6 до 10	3	4	5	7	12	15	
		Св. 10 до 16	3	5	6	9	14	19	
		Св. 16 до 25	4	6	8	11	18	24	
Св. 25 до 40	5	7	11	15	24	31			

Продолжение табл. 2.17

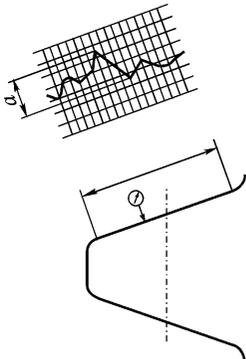
Номер изменения	Схема контроля	Контролируемый параметр	Диапазон модулей, мм	Допуск и предельное отклонение (мкм) для класса точности							
				4A	3A	2A	A	B	C	D	
3	 <p>Схема контроля</p>	Контролируемый параметр	Радиальное биение по вершинам зубьев	От 0,5 до 1	8	12	17	24	43	86	113
				Св. 1 до 2	8	12	17	24	43	86	113
				Св. 2 до 3,5	10	15	21	30	53	106	140
				Св. 3,5 до 6	13	18	26	37	66	132	174
				Св. 6 до 10	16	23	33	46	83	166	219
				Св. 10 до 16	20	29	41	58	104	207	274
4	 <p>Радиальное биение вершин зубьев фрезы относительно её оси</p>	Профиль передней поверхности	Св. 16 до 25	25	36	51	72	130	259	342	
			Св. 25 до 40	33	48	67	95	171	342	451	
			От 0,5 до 1	6	9	13	19	33	33	44	
			Св. 1 до 2	6	9	13	19	33	33	44	
			Св. 2 до 3,5	8	12	16	23	42	42	55	
			Св. 3,5 до 6	10	14	20	29	52	52	68	
4	 <p>Прямолнейность и наклон линии пересечения передней поверхности и плоскости, перпендикулярной оси фрезы на рабочей высоте зуба</p>	Св. 6 до 10	13	18	26	36	65	65	86		
		Св. 10 до 16	16	23	32	45	81	81	107		
		Св. 16 до 25	20	28	40	56	101	101	134		
		Св. 25 до 40	26	37	53	74	134	134	177		

<p>5</p>  <p>Наибольшая алгебраическая разность отклонений соседних окружных шагов стругечных канавок по окружности, близкой к средней расчётной</p>	Разность соседних окружных шагов		От 0,5 до 1	7	10	15	21	37	37	49
	Св. 1 до 2	7	10	15	21	37	37	49		
	Св. 2 до 3,5	9	13	18	26	46	46	61		
	Св. 3,5 до 6	11	16	23	32	58	58	76		
	Св. 6 до 10	14	20	29	40	73	73	96		
	Св. 10 до 16	18	25	36	50	91	91	120		
	Св. 16 до 25	22	32	45	63	113	113	150		
	Св. 25 до 40	29	42	59	83	150	150	198		
	От 0,5 до 1	14	19	27	39	69	69	92		
	Св. 1 до 2	14	19	27	39	69	69	92		
<p>6</p>  <p>Наибольшая алгебраическая разность значений накопленной погрешности в пределах одного обода по окружности, близкой к средней расчётной</p>	Накопленная погрешность окружных шагов стругечных канавок		От 0,5 до 1	14	19	27	39	69	69	92
	Св. 1 до 2	14	19	27	39	69	69	92		
	Св. 2 до 3,5	17	24	34	48	86	86	114		
	Св. 3,5 до 6	21	30	42	60	107	107	142		
	Св. 6 до 10	26	37	53	75	135	135	178		
	Св. 10 до 16	33	47	66	94	168	168	223		
	Св. 16 до 25	41	59	83	117	211	211	278		
	Св. 25 до 40	54	77	110	154	278	278	368		

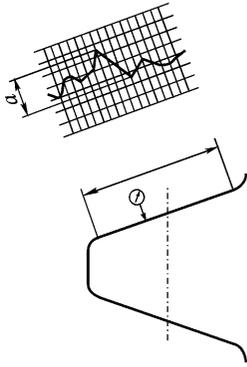
Продолжение табл. 2.17

Номер измерения	Схема контроля	Контролируемый параметр	Диапазон модулей, мм	Допуск и предельное отклонение (мкм) для класса точности						
				4A	3A	2A	A	B	C	D
7	 <p>Отклонение передней поверхности от номинального расположения, отнесённое на 100 мм длины рабочей части фрезы</p>	Направление стружечных канавок на длине 100 мм	От 0,5 до 40	±28	±40	±57	±80	±100	±114	±185

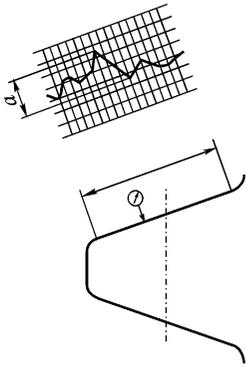
Продолжение табл. 2.17

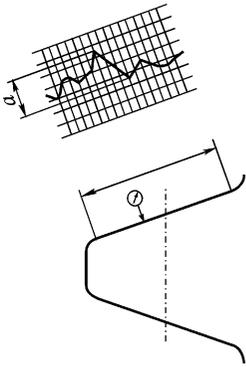
8		<p>Профиль по нормали между двумя номинальными профилями, ограничивающими действительный профиль, измеренное в заданном сечении в пределах рабочего участка зуба</p>	Профиль зуба (однорядные фрезы)		Профиль зуба (двухрядные фрезы)		От 0,5 до 1	3	4	5	7	15	30	35
			Св. 1 до 2	3	4	5	7	15	30	39				
			Св. 2 до 3,5		3	5	7	9	18	37	49			
			Св. 3,5 до 6		4	6	8	11	23	46	61			
			Св. 6 до 10		5	7	10	14	29	58	76			
			Св. 10 до 16		6	9	13	18	36	72	95			
			Св. 16 до 25		8	11	16	23	45	90	119			
			Св. 25 до 40		10	15	21	30	59	119	157			
			От 0,5 до 1		3	5	7	9	19	37	49			
			Св. 1 до 2		3	5	7	9	19	37	49			
			Св. 2 до 3,5		4	6	8	12	23	46	61			
			Св. 3,5 до 6		5	7	10	14	29	57	76			
			Св. 6 до 10		6	9	13	18	36	72	95			
			Св. 10 до 16		8	11	16	23	45	90	119			
			Св. 16 до 25		-	-	-	-	-	-	-			
			Св. 25 до 40		-	-	-	-	-	-	-			

Продолжение табл. 2.17

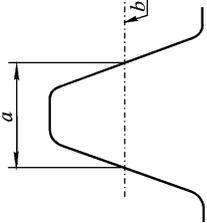
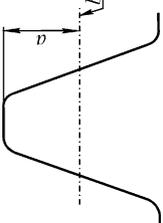
Номер измерения	Схема контроля	Контролируемый параметр	Диапазон модулей, мм	Допуск и предельное отклонение (мкм) для класса точности														
				4A	3A	2A	A	B	C	D								
8		Профиль зуба (трех- или четырех-заходные фрезы)	От 0,5 до 1	4	6	8	12	23	46	61								
			Св. 1 до 2	4	6	8	12	23	46	61								
			Св. 2 до 3,5	5	7	10	14	29	58	76								
			Св. 3,5 до 6	6	9	13	18	36	72	95								
			Св. 6 до 10	-	-	-	-	-	-	-								
		Св. 10 до 16	-	-	-	-	-	-	-									
		Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-									
		Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-									
		От 0,5 до 1	5	7	10	14	29	58	76									
		Св. 1 до 2	5	7	10	14	29	58	76									
Св. 2 до 3,5	6	9	13	18	36	72	95											
Св. 3,5 до 6	-	-	-	-	-	-	-											
Св. 6 до 10	-	-	-	-	-	-	-											
Св. 10 до 16	-	-	-	-	-	-	-											
Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-											
Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-											
		Профиль зуба (пяти-, шести или семизаходные фрезы)																
	Расстояние по нормали между двумя номинальными профилями, ограничивающими действительный профиль, измеренное в заданном сечении в пределах рабочего участка зуба																	

Продолжение табл. 2.17

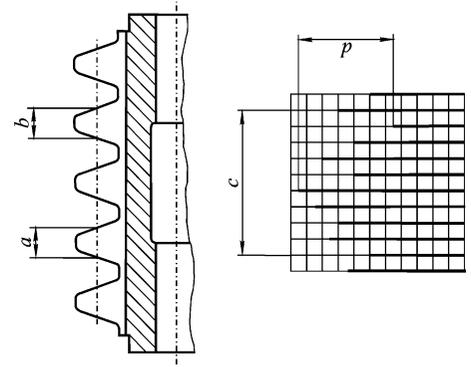
8А		<p>Профиль по нормали между двумя номинальными профилями, ограничивающими действительный профиль, измеренное в заданном сечении в пределах рабочего участка зуба при использовании проверки линии зацепления</p>	<p>Профиль зуба (одно-заходные фрезы)</p>	От 0,5 до 1	4	6	9	13	25	50	67
				Св. 1 до 2	4	6	9	13	25	50	67
			<p>Профиль зуба (двух-заходные фрезы)</p>	Св. 2 до 3,5	5	8	11	16	31	63	83
				Св. 3,5 до 6	7	10	14	20	39	78	103
			Св. 6 до 10	9	12	17	24	49	98	129	
			Св. 10 до 16	11	15	22	31	61	112	162	
			Св. 16 до 25	13	19	27	38	77	153	202	
			Св. 25 до 40	18	25	36	50	101	202	267	
			От 0,5 до 1	6	8	11	16	32	63	83	
			Св. 1 до 2	6	8	11	16	32	63	83	
			Св. 2 до 3,5	7	10	14	20	39	78	104	
			Св. 3,5 до 6	9	12	17	24	49	98	129	
			Св. 6 до 10	11	15	22	31	61	122	162	
			Св. 10 до 16	13	19	27	38	77	153	202	
			Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-	
			Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-	

Номер измерения	Схема контроля	Контролируемый параметр	Диапазон модулей, мм	Допуск и предельное отклонение (мкм) для класса точности						
				4A	3A	2A	A	B	C	D
8A	 <p>Расстояние по нормали между двумя номинальными профилями, ограничивающими действительный профиль, измеренное в заданном сечении в пределах рабочего участка зуба при использовании проверки линии зацепления</p>	Профиль зуба (трех- или четырех-заходные фрезы)	От 0,5 до 1	7	10	14	20	39	79	104
			Св. 1 до 2	7	10	14	20	39	79	104
			Св. 2 до 3,5	9	12	17	24	49	98	129
			Св. 3,5 до 6	11	15	22	30	61	122	161
			Св. 6 до 10	-	-	-	-	-	-	-
			Св. 10 до 16	-	-	-	-	-	-	-
			Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-
			Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-
			От 0,5 до 1	9	12	17	25	49	96	130
			Св. 1 до 2	9	12	17	25	49	96	130
Св. 2 до 3,5	11	15	22	31	61	122	161			
Св. 3,5 до 6	-	-	-	-	-	-	-			
Св. 6 до 10	-	-	-	-	-	-	-			
Св. 10 до 16	-	-	-	-	-	-	-			
Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-			
Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-			

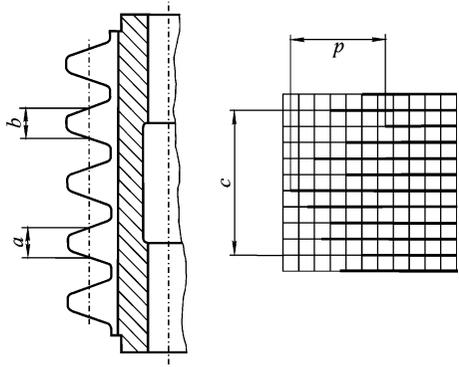
Продолжение табл. 2.17

9	 <p>Отклонение толщины зуба, измеренное на высоте головки в нормируемом сечении (только в минус)</p>	Толщина зуба	От 0,5 до 1	16	16	22	22	45	45	57	
			Св. 1 до 2	16	16	22	22	45	45	57	
9А	 <p>Отклонение толщины зуба, измеренное на высоте головки в нормируемом сечении (только в плюс)</p>	Толщина на головке зуба	От 0,5 до 1	<p>Отклонения, указанные в п.9, должны быть поделены на величину $2f_g a$, где a – угол профиля исходного контура</p>	Св. 1 до 2	Св. 2 до 3,5	Св. 3,5 до 6	Св. 6 до 10	Св. 10 до 16	Св. 16 до 25	Св. 25 до 40
			Св. 1 до 2		Св. 2 до 3,5	Св. 3,5 до 6	Св. 6 до 10	Св. 10 до 16	Св. 16 до 25	Св. 25 до 40	
			Св. 2 до 3,5		Св. 3,5 до 6	Св. 6 до 10	Св. 10 до 16	Св. 16 до 25	Св. 25 до 40		
			Св. 3,5 до 6		Св. 6 до 10	Св. 10 до 16	Св. 16 до 25	Св. 25 до 40			
			Св. 6 до 10		Св. 10 до 16	Св. 16 до 25	Св. 25 до 40				
			Св. 10 до 16		Св. 16 до 25	Св. 25 до 40					
			Св. 16 до 25		Св. 25 до 40						

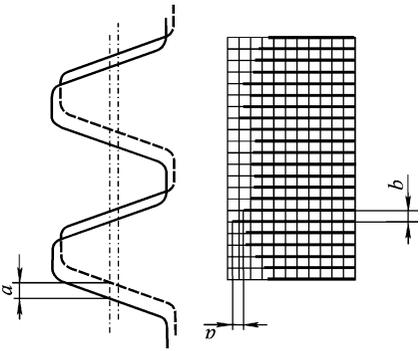
Продолжение табл. 2.17

Номер измерения	Схема контроля	Контролируемый параметр	Диапазон модулей, мм	Допуск и предельное отклонение (мкм) для класса точности				
				4A	3A	2A	A	B
9B	 <p>Отклонение между максимальной и минимальной толщиной зубьев вдоль стружечной канавки</p>	Толщина зуба, измеренная вдоль стружечной канавки (однозаходные фрезы)	От 0,5 до 1	4	6	8	Измерение по п. 9B применяется только для классов точности 4A, 3A и 2A	
			Св. 1 до 2	4	6	8		
			Св. 2 до 3,5	5	7	10		
			Св. 3,5 до 6	6	9	13		
			Св. 6 до 10	8	12	16		
			Св. 10 до 16	10	14	20		
			Св. 16 до 25	13	18	26		
			Св. 25 до 40	17	24	34		
			От 0,5 до 1	5	7	11		
			Св. 1 до 2	5	7	11		
Св. 2 до 3,5	6	9	13					
Св. 3,5 до 6	8	11	16					
Св. 6 до 10	10	14	20					
Св. 10 до 16	13	18	26					
Св. 16 до 25	–	–	–					
Св. 25 до 40	–	–	–					

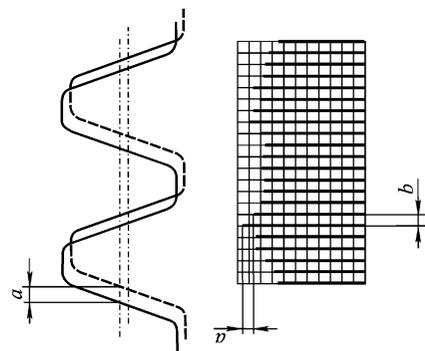
Продолжение табл. 2.17

9В	 <p>Отклонение между максимальной и минимальной толщиной зубьев вдоль стружечной канавки</p>	<p>Толщина зуба, измеренная вдоль стружечной канавки (трех- и четырехходовые фрезы)</p>	<p>Толщина зуба, измеренная вдоль стружечной канавки (пяти-, шести- и сешиходные мизаходные фрезы)</p>	<p>Измерение по п. 9В применяется только для классов точности 4А, 3А и 2А</p>						
				От 0,5 до 1	6	9	13	16	20	
		Св. 1 до 2	6	9	13					
		Св. 2 до 3,5	8	12	16					
		Св. 3,5 до 6	10	14	20					
		Св. 6 до 10	–	–	–					
		Св. 10 до 16	–	–	–					
		Св. 16 до 25	–	–	–					
		Св. 25 до 40	–	–	–					
		От 0,5 до 1	8	12	16					
		Св. 1 до 2	8	12	16					
		Св. 2 до 3,5	10	14	20					
		Св. 3,5 до 6	–	–	–					
		Св. 6 до 10	–	–	–					
		Св. 10 до 16	–	–	–					
		Св. 16 до 25	–	–	–					
		Св. 25 до 40	–	–	–					

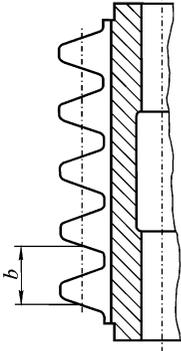
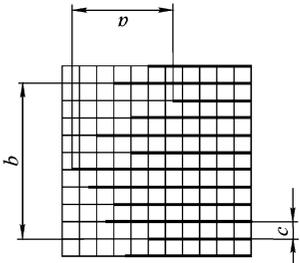
Продолжение табл. 2.17

Номер измерения	Схема контроля	Контролируемый параметр	Диапазон модулей, мм	Допуск и предельное отклонение (мкм) для класса точности						
				4A	3A	2A	A	B	C	D
10	 <p>Наибольшая разность отклонений точек режущих кромок фрезы, лежащих на цилиндре, соосном с отверстием фрезы, относительно теоретической винтовой линии, измеренная на нормируемом участке</p>	<p>Винтовая линия от зуба к зубу (однозаходные фрезы)</p>	От 0,5 до 1	2	3	4	6	12	24	31
			Св. 1 до 2	2	3	4	6	12	24	31
			Св. 2 до 3,5	3	4	5	7	15	30	39
			Св. 3,5 до 6	3	5	7	9	18	37	48
			Св. 6 до 10	4	6	8	12	23	46	61
			Св. 10 до 16	5	7	10	14	29	58	76
			Св. 16 до 25	6	9	13	18	36	72	95
			Св. 25 до 40	8	12	17	24	48	95	125
			От 0,5 до 1	3	4	5	7	15	30	39
			Св. 1 до 2	3	4	5	7	15	30	39
Св. 2 до 3,5	3	5	7	9	18	37	49			
Св. 3,5 до 6	4	6	8	11	23	46	61			
Св. 6 до 10	5	7	10	14	29	58	76			
Св. 10 до 16	6	9	13	18	36	72	95			
Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-			
Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-			

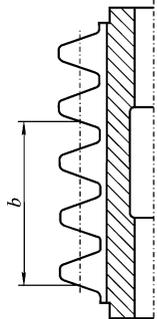
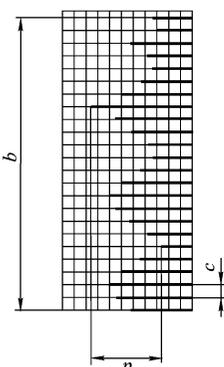
Продолжение табл. 2.17

10		<p>Винтовая линия от зуба к зубу (трех- и четырехзубные фрезы)</p>	От 0,5 до 1	3	5	7	9	19	37	49
			Св. 1 до 2	3	5	7	9	19	37	49
		<p>Винтовая линия от зуба к зубу (пяти-, шести- и семизубные фрезы)</p>	Св. 2 до 3,5	4	6	8	12	23	46	61
			Св. 3,5 до 6	5	7	10	14	29	57	76
			Св. 6 до 10	—	—	—	—	—	—	—
			Св. 10 до 16	—	—	—	—	—	—	—
			Св. 16 до 25	—	—	—	—	—	—	—
			Св. 25 до 40	—	—	—	—	—	—	—
			От 0,5 до 1	4	6	8	12	23	46	61
			Св. 1 до 2	4	6	8	12	23	46	61
			Св. 2 до 3,5	5	7	10	14	29	58	76
			Св. 3,5 до 6	—	—	—	—	—	—	—
			Св. 6 до 10	—	—	—	—	—	—	—
			Св. 10 до 16	—	—	—	—	—	—	—
			Св. 16 до 25	—	—	—	—	—	—	—
			Св. 25 до 40	—	—	—	—	—	—	—

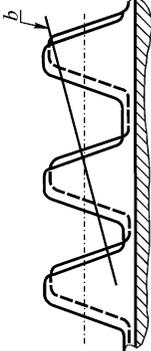
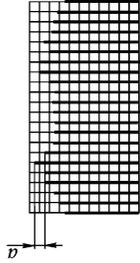
Продолжение табл. 2.17

Номер измерения	Схема контроля	Контролируемый параметр	Диапазон модулей, мм	Допуск и предельное отклонение (мкм) для класса точности						
				4A	3A	2A	A	B	C	D
11		Винтовая линия на одном обороте (для фрез с числом заходов от 1 до 7)	От 0,5 до 1	4	5	7	10	21	42	55
			Св. 1 до 2	4	5	7	10	21	42	55
			Св. 2 до 3,5	5	6	9	13	26	52	68
			Св. 3,5 до 6	6	8	11	16	32	64	85
			Св. 6 до 10	7	10	14	20	40	81	106
			Св. 10 до 16	9	13	18	25	50	101	133
			Св. 16 до 25	11	16	22	32	63	126	166
11A		Винтовая линия на одном обороте при использовании проверки линии зацепления	Св. 25 до 40	15	21	30	42	83	166	220
			От 0,5 до 1	4	6	8	12	24	48	63
			Св. 1 до 2	4	6	8	12	24	48	63
			Св. 2 до 3,5	5	7	10	15	30	59	78
			Св. 3,5 до 6	6	9	13	18	37	73	97
			Св. 6 до 10	8	12	16	23	46	92	122
			Св. 10 до 16	10	14	20	29	58	115	152
Св. 16 до 25	13	18	26	36	72	144	190			
Св. 25 до 40	17	24	34	48	95	190	251			

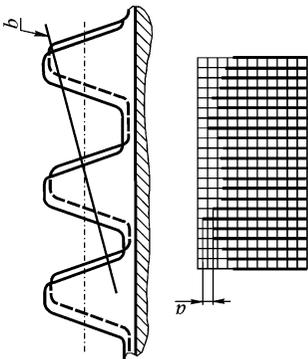
Продолжение табл. 2.17

12		<p>Винтовая линия на трёх оборотах (для фрез с числом заходов от 1 до 7)</p>	От 0,5 до 1	7	10	14	19	39	77	102
			Св. 1 до 2	7	10	14	19	39	77	102
12А		<p>Винтовая линия на трёх оборотах при использовании проверки линии заплеления (для фрез с числом заходов от 1 до 7)</p>	Св. 2 до 3,5	8	12	17	24	48	96	127
			Св. 3,5 до 6	10	15	21	30	60	119	158
			Св. 6 до 10	13	19	27	37	75	150	198
			Св. 10 до 16	16	23	33	47	94	187	247
			Св. 16 до 25	20	29	42	59	117	234	309
			Св. 25 до 40	27	39	55	77	154	309	408
			От 0,5 до 1	9	13	19	27	53	107	141
			Св. 1 до 2	9	13	19	27	53	107	141
			Св. 2 до 3,5	12	17	24	33	66	133	175
			Св. 3,5 до 6	14	21	29	41	83	165	218
	Св. 6 до 10	18	26	37	52	104	207	274		
	Св. 10 до 16	23	32	46	65	130	259	342		
	Св. 16 до 25	28	41	58	81	162	324	428		
	Св. 25 до 40	37	53	76	107	214	428	565		

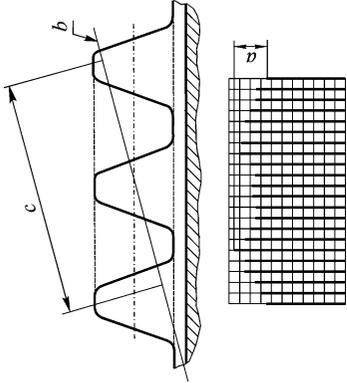
Продолжение табл. 2.17

Номер измерения	Схема контроля	Контролируемый параметр	Диапазон модулей, мм	Допуск и предельное отклонение (мкм) для класса точности						
				4A	3A	2A	A	B	C	D
13		<p>Погрешность зацепления от зуба к зубу (однозаходные фрезы)</p>	От 0,5 до 1	2	3	4	6	12	24	31
			Св. 1 до 2	2	3	4	6	12	24	31
			Св. 2 до 3,5	3	4	5	7	15	30	39
			Св. 3,5 до 6	3	5	7	9	18	37	48
			Св. 6 до 10	4	6	8	12	23	46	61
			Св. 10 до 16	5	7	10	14	29	58	76
	 <p>Наибольшая разность отклонений точек режущих кромок, лежащих на линии зацепления, относительно теоретической винтовой поверхности, измеренная на нормируемом участке</p>	<p>Погрешность зацепления от зуба к зубу (двухзаходные фрезы)</p>	Св. 16 до 25	6	9	13	18	36	72	95
			Св. 25 до 40	8	12	17	24	48	95	125
			От 0,5 до 1	3	4	5	7	15	30	39
			Св. 1 до 2	3	4	5	7	15	30	39
			Св. 2 до 3,5	3	5	7	9	18	37	49
			Св. 3,5 до 6	4	6	8	11	23	46	61
			Св. 6 до 10	5	7	10	14	29	58	76
Св. 10 до 16	6	9	13	18	36	72	95			
Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-			
Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-			

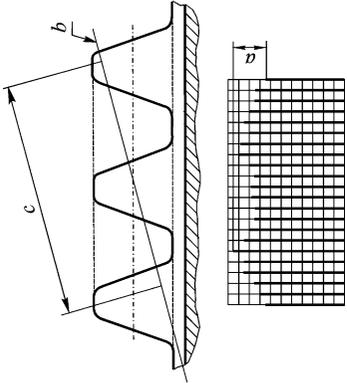
Продолжение табл. 2.17

13	 <p>Наибольшая разность отклонений точек режущих кромок, лежащих на линии зацепления, относительно теоретической винтовой поверхности, измеренная на нормируемом участке</p>	Погрешность зацепления от зуба к зубу (трёх- и четырёхзачодные фрезы)	От 0,5 до 1	3	5	7	9	19	37	49
		Погрешность зацепления от зуба к зубу (пяти-, шести- и семизачодные фрезы)	От 0,5 до 1	4	6	8	12	23	46	61
		Св. 1 до 2	3	5	7	9	19	37	49	49
		Св. 2 до 3,5	4	6	8	12	23	46	61	61
		Св. 3,5 до 6	5	7	10	14	29	57	76	76
		Св. 6 до 10	-	-	-	-	-	-	-	-
		Св. 10 до 16	-	-	-	-	-	-	-	-
		Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-	-
		Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-	-
		От 0,5 до 1	4	6	8	12	23	46	61	61
		Св. 1 до 2	4	6	8	12	23	46	61	61
		Св. 2 до 3,5	5	7	10	14	29	58	76	76
		Св. 3,5 до 6	-	-	-	-	-	-	-	-
		Св. 6 до 10	-	-	-	-	-	-	-	-
		Св. 10 до 16	-	-	-	-	-	-	-	-
		Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-	-
		Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-	-

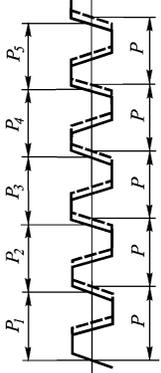
Продолжение табл. 2.17

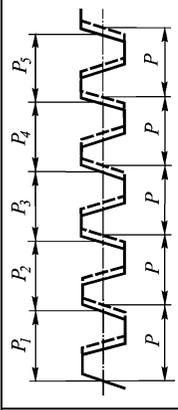
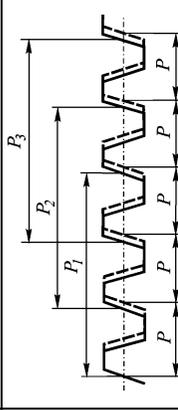
Номер изменения	Схема контроля	Контролируемый параметр	Диапазон модулей, мм	Допуск и предельное отклонение (мкм) для класса точности						
				4A	3A	2A	A	B	C	D
14		Погрешность зацепления (однозаходные фрезы)	От 0,5 до 1	5	7	11	15	30	59	78
			Св. 1 до 2	5	7	11	15	30	59	78
			Св. 2 до 3,5	6	9	13	18	37	74	97
			Св. 3,5 до 6	8	11	16	23	46	92	121
			Св. 6 до 10	10	14	20	29	58	115	152
			Св. 10 до 16	13	18	26	36	72	144	190
			Св. 16 до 25	16	23	32	45	90	180	238
		Св. 25 до 40	21	30	42	59	119	238	314	
		От 0,5 до 1	6	9	13	19	37	74	98	
		Св. 1 до 2	6	9	13	19	37	74	98	
		Св. 2 до 3,5	8	12	16	23	46	92	122	
		Св. 3,5 до 6	10	14	20	29	57	115	151	
		Св. 6 до 10	13	18	26	36	72	144	190	
		Св. 10 до 16	16	23	32	45	90	180	238	
Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-			
Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-			

Продолжение табл. 2.17

14		<p>Погрешность зацепления (трёх- и четырёх-заходные фрезы)</p>	От 0,5 до 1	8	12	16	23	46	93	122	
			Св. 1 до 2	8	12	16	23	46	93	122	
		<p>Погрешность зацепления (пяти-, шести- и семи-заходные фрезы)</p>	Св. 2 до 3,5	10	14	20	29	58	115	152	
			Св. 3,5 до 6	13	18	25	36	72	143	189	
			Св. 6 до 10	-	-	-	-	-	-	-	-
			Св. 10 до 16	-	-	-	-	-	-	-	-
			Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-	-
			Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-	-
			От 0,5 до 1	10	14	21	29	58	116	153	
			Св. 1 до 2	10	14	21	29	58	116	153	
Св. 2 до 3,5	13	18	26	36	72	144	190				
Св. 3,5 до 6	-	-	-	-	-	-	-	-			
Св. 6 до 10	-	-	-	-	-	-	-	-			
Св. 10 до 16	-	-	-	-	-	-	-	-			
Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-	-			
Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-	-			

Продолжение табл. 2.17

Номер изме- рения	Схема контроля	Контролируе- мый параметр	Диапазон модулей, мм	Допуск и предельное отклонение (мкм) для класса точности						
				4A	3A	2A	A	B	C	D
15	 <p>Максимальное отклонение осевого шага между заходами на любых двух соседних зубьях, принадлежащих различным заходам в пределах двух соседних стружечных канавок</p>	Отклонение осевого шага между заходами (двухзаходные фрезы)	От 0,5 до 1	3	4	6	8	17	33	44
			Св. 1 до 2	3	4	6	8	17	33	44
			Св. 2 до 3,5	4	5	7	10	21	42	55
			Св. 3,5 до 6	5	6	9	13	26	52	68
			Св. 6 до 10	6	8	12	16	32	65	86
			Св. 10 до 16	7	10	14	20	41	81	107
			Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-
			Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-
			От 0,5 до 1	4	5	7	10	21	42	55
			Св. 1 до 2	4	5	7	10	21	42	55
Св. 2 до 3,5	5	6	9	13	26	52	68			
Св. 3,5 до 6	6	8	11	16	32	64	85			
Св. 6 до 10	-	-	-	-	-	-	-			
Св. 10 до 16	-	-	-	-	-	-	-			
Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-			
Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-			

15	 <p>Максимальное отклонение осевого шага между заходами на любых двух соседних зубьях, принадлежащих различным заходам в пределах двух соседних стружечных канавок</p>	Отклонение осевого шага между заходами (пяти-, шести- и семизаходные фрезы)	От 0,5 до 1 Св. 1 до 2 Св. 2 до 3,5 Св. 3,5 до 6 Св. 6 до 10 Св. 10 до 16 Св. 16 до 25 Св. 25 до 40	5	7	9	13	26	52	69
16	 <p>Максимальное отклонение осевого шага между заходами на любых трёх зубьях, принадлежащих различным заходам в пределах двух соседних стружечных канавок</p>	Максимальное отклонение осевого шага между заходами на любых трёх зубьях (двухзаходные фрезы)	От 0,5 до 1 Св. 1 до 2 Св. 2 до 3,5 Св. 3,5 до 6 Св. 6 до 10 Св. 10 до 16 Св. 16 до 25 Св. 25 до 40	5	7	11	15	30	50	78

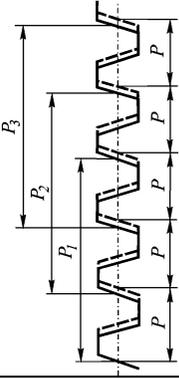
Номер изменения	Схема контроля	Контролируемый параметр	Диапазон модулей, мм	Допуск и предельное отклонение (мкм) для класса точности						
				4A	3A	2A	A	B	C	D
16	 <p>Максимальное отклонение осевого шага между заходами на любых трёх зубьях (трёх- и четырёхзаходные фрезы)</p>	Максимальное отклонение осевого шага между заходами на любых трёх зубьях (трёх- и четырёхзаходные фрезы)	От 0,5 до 1	6	9	13	19	37	74	98
			Св. 1 до 2	6	9	13	19	37	74	98
			Св. 2 до 3,5	8	12	16	23	46	92	122
			Св. 3,5 до 6	10	14	20	29	57	115	151
			Св. 6 до 10	-	-	-	-	-	-	-
			Св. 10 до 16	-	-	-	-	-	-	-
			Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-
			Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-
			От 0,5 до 1	8	12	16	23	46	93	122
			Св. 1 до 2	8	12	16	23	46	93	122
Максимальное отклонение осевого шага между заходами на любых трёх зубьях (пяти-, шести- и семизаходные фрезы)	Максимальное отклонение осевого шага между заходами на любых трёх зубьях (пяти-, шести- и семизаходные фрезы)	Св. 2 до 3,5	10	14	20	29	58	115	152	
		Св. 3,5 до 6	-	-	-	-	-	-	-	
		Св. 6 до 10	-	-	-	-	-	-	-	
		Св. 10 до 16	-	-	-	-	-	-	-	
Св. 16 до 25	-	-	-	-	-	-	-			
Св. 25 до 40	-	-	-	-	-	-	-			

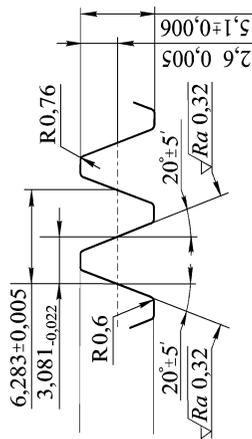
Таблица 2.18. Обозначения параметров a , b , c , d на схемах контроля табл. 2.17

Номер измерения	Обозначение			
	a	b	c	d
4	Отклонение	–	–	–
5	Отклонение	–	–	–
6	Отклонение	–	–	–
7	Отклонение	–	–	–
8	Отклонение	–	–	–
8А	Отклонение	–	–	–
9	Толщина зуба	Нормируемый диаметр	–	–
9А	Толщина на головке зуба	Нормируемый диаметр	–	–
9В	Максимальная толщина	Минимальная толщина	Стружечная канавка	Максимальное отклонение
10	Отклонение	Соседние по витку зубья	–	–
11	Отклонение	Один осевой шаг	Один зуб	–
11А	Отклонение	Один осевой шаг	Один зуб	–
12	Отклонение	Три осевых шага	Один зуб	–
12А	Отклонение	Три осевых шага	Один зуб	–
13	Отклонение	Линия зацепления	–	–
14	Общее отклонение	Линия зацепления	Активная длина	–

На рис. 2.14 представлен пример конструктивного оформления спроектированной червячной модульной фрезы, предназначенной для нарезания цилиндрического зубчатого колеса, геометрические параметры которого приведены на рис. 1.4.

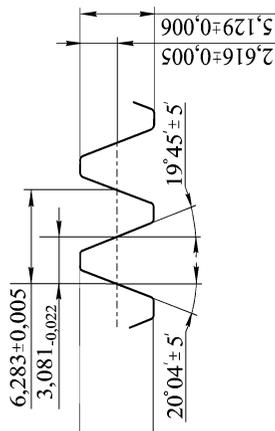
А-А (4:1) ⊙

Профиль зубьев в нормальном сечении

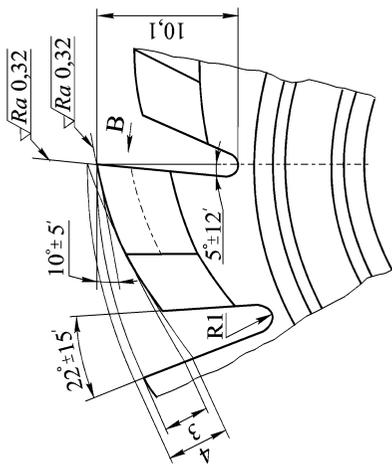


В (4:1)

Профиль зубьев в плоскости передней поверхности



Б (4:1)



1. Твёрдость 63...66 HRC.
2. Неуказанные радиусы $R = 1$ мм.
3. * Размеры для справок.
4. Отклонение профиля передней поверхности $f_{\gamma} \leq 0,019$ мм.
5. Накопленная погрешность окружного шага стружечных канавок $F_{r0} \leq 0,039$ мм.
6. Отклонение направления стружечных канавок на длине 100 мм $f_x \leq \pm 80$ мм.

Рис. 2.14. Продолжение

$\sqrt{Ra\ 2,5\ (\surd)}$

Модуль	m	2
Угол профиля исходного контура	α	20°
Число зубьев фрезы	z_0	14
Число заходов	k_0	1
Направление витков фрезы	–	правое
Угол подъёма витков	γ_{m0}	$1^\circ 55'$
Направление стружечных канавок	-	левое
Шаг зубьев в нормальном сечении	P_{n0}	6,283
Толщина зубьев в нормальном сечении	S_{n0}	3,081
Ход стружечной канавки	P_z	5614
Класс точности фрезы по ГОСТ 9324-2015	-	A
Исходный червяк по ГОСТ 19036-94	ZN	Конволютный

7. Отклонение профиля зуба $f_{f0} \leq 0,007$ мм.
8. Отклонение винтовой линии фрезы на одном обороте $f_{ho} \leq 0,01$ мм.
9. Отклонение винтовой линии фрезы на трех оборотах $f_{h3o} \leq 0,019$ мм.
10. Погрешность зацепления от зуба к зубу $f_{pb,0} \leq 0,006$ мм.
11. Неуказанные предельные отклонения размеров: отверстий по H16, валов по h16, остальных $\pm \frac{IT16}{2}$.
12. На наружную поверхность червячной фрезы методом PVD нанести износостойкое покрытие TiAlN.
13. Маркировать: товарный знак предприятия-изготовителя; модуль; угол профиля; обозначение класса точности; угол подъёма витка, ход стружечной канавки, марку инструментальной стали ($m = 2$; $\alpha = 20^\circ$; A; $\gamma_{m0} = 1^\circ 55'$; $P_z = 5614$; 10P6M5).

Рис. 2.14. Окончание

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как было отмечено во введении зуборезные долбяки и червячные модульные фрезы являются основными режущими инструментами, используемыми для формирования профиля рабочего венца зубчатых колес. Поэтому знание процессов зубообработки, выполняемых посредством данных инструментов, возможностей этих процессов и освоение методик проектирования зуборезных долбяков и червячных фрез является важной составляющей совокупности знаний в области технологии производства авиационных и автомобильных двигателей, различных агрегатов, трансмиссий и других изделий машиностроения, содержащих зубчатые колеса. Вместе с тем доскональное изучение указанного ранее инструмента и его функциональных возможностей может быть осуществлено лишь на этапах курсового проектирования и выполнения выпускной квалификационной работы (ВКР). Только в этом случае студент или магистрант приобретает практические навыки, необходимые для выполнения своих функциональных обязанностей конструктору-инструментальщику или квалифицированному технологу современного машиностроительного предприятия. Особенно это важно для инженерно-технического персонала предприятий авиакосмического комплекса, где к производству и качеству обработки зубчатых колес предъявляются повышенные требования.

Рассмотренные в предлагаемом пособии методики расчёта прямозубых долбяков и червячных модульных фрез, а также примеры проектирования данных инструментов применительно к конкретному зубчатому колесу, позволяют обучающемуся в лучшей степени усвоить изложенные в учебном пособии методики проек-

тирования инструментов и закрепить теоретические знания, полученные в базовых лекционных курсах.

Данное учебное пособие является составной частью учебно-методических комплексов по таким дисциплинам, как «Механическая обработка материалов», «Процессы и операции формообразования», «Современный режущий инструмент», «Обработка конструкционных материалов», входящих в учебные планы по направлениям подготовки 150301, 150305, 240305 и специальности 240502.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андриенко, Л.А. Детали машин: учебник / Л.А. Андриенко [и др.]; под ред. О.А. Ряховского. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 544 с. – ISBN 5-7038-1773-0.
2. Ануриев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. Т.2 / В.И. Ануриев. – М.: Машиностроение, 1980. – 559 с.
3. Баранчиков, В.И. Справочник конструктора-инструментальщика / В.И. Баранчиков [и др.]; под общ. ред. В.А. Гречишникова и С.В. Кирсанова. – М.: Машиностроение, 2006. – 542 с. – ISBN 5-217-03353-3.
4. Климов, В.И. Справочник инструментальщика – конструктора / В.И. Климов [и др.]. – М. – Свердловск: Машгиз, 1958. – 605 с.
5. Кожевников, Д.В. Режущий инструмент: учебник / Д.В. Кожевников [и др.]; под ред. С.В. Кирсанова. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с. – ISBN 5-217-03250-2.
6. Ординарцев, И.А. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев [и др.]; под общ. ред. Ординарцева И.А. – Л.: Машиностроение, 1987. – 846 с.
7. Петруха, П.Г. Технология обработки конструкционных материалов: учебник / П.Г. Петруха [и др.]; под ред. П.Г. Петрухи. – М.: Высшая школа, 1991. – 512 с. – ISBN 5-06-000703-0.
8. Рыжкин, А.А. Режущий инструмент: учебное пособие / А.А. Рыжкин [и др.]. – Ростов н/Д: Феникс, 2009. – 405 с. – ISBN 978-5-222-15232-4.
9. Скуратов, Д.Л. Обработка конструкционных материалов. Процессы, инструменты и станки. Ч.2: учебное пособие / Д.Л. Скуратов, А.И. Хаймович, С.Р. Абульханов. – Самара: Изд-во Самар. нац. исслед. ун-та, 2018. – 124 с. – ISBN 978-5-7883-1315-3
10. Урывский, Ф.П. Проектирование и расчёт червячных модульных фрез: методические указания / Ф.П. Урывский, В.Н. Трусов, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1983. – 30 с.
11. Фельдштейн, Е.Э. Металлорежущие инструменты: справочник конструктора / Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – Минск: Новое знание, 2009. – 1039 с. – ISBN 978-985-475-346-1.

12. Фельдштейн, Е.Э. Режущий инструмент. Курсовое и дипломное проектирование: учебное пособие / Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич, В.И. Шагун; под ред. Е.Э. Фельдштейна. – Минск: Дизайн ПРО, 2002. – 320 с. – ISBN 985-452-052-8.

13. ГОСТ 1643-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – Введ. 1981-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 72 с.

14. ГОСТ 9323-79 Долбяки зуборезные чистовые. Технические условия. – Введ. 1981-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 72 с.

15. ГОСТ 9324-2015 Фрезы червячные цельные чистовые для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем. Технические условия. – Введ. 2017-01-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 40 с.

16. ГОСТ 9472-90 Крепление инструментов на оправках. Типы и размеры. – Введ. 1991.07.01. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 14 с.

17. ГОСТ 19265-73. Прутки и полосы из быстрорежущей стали. Технические условия. – Введ. 1975-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 22 с.

Учебное издание

*Скуратов Дмитрий Леонидович,
Швецов Алексей Николаевич*

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗУБОРЕЗНОГО ИНСТРУМЕНТА
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС**

Учебное пособие

Редакционно-издательская обработка
издательства Самарского университета

Подписано в печать 07.11.2023. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 8,0.

Тираж 120 экз. (1-й з-д 1-27). Заказ № . Арт. – 10(Р2УП)/2023.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.