

Н.А. КОВРИШКИН, канд. техн. наук, Кировоградский НТУ,
О.И. САДЧЕНКО, асп., Кировоградский НТУ

ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧЕРВЯЧНЫХ КОЛЕС ЧЕРВЯЧНЫХ ПЕРЕДАЧ С ВОГНУТЫМ ПРОФИЛЕМ ВИТКА ЧЕРВЯКА

Розглянуто питання геометрії зубців черв'ячних фрез з розділенням на три частини по висоті профілем початкового контуру для обробки черв'ячних коліс черв'ячних передач з угнутих профілем витка черв'яка. Проведено розрахунки вершинних та бокових задніх кутів зуба нової черв'ячної фрези.

Questions of worm mills tooth geometry with distributed on three parts on height a structure of an initial contour for processing worm wheels of worm gears with a concave profile of a worm are considered. Calculations of topmost and lateral back corners of a tooth of a new worm mill are carried out.

Постановка проблемы. В машиностроении показатели качества изделий тесно связаны с точностью обработки деталей машин. При разработке современных металлорежущих станков вопросы повышения точности отдельных механизмов и станка в целом имеют большое значение и являются актуальными.

В металлорежущих станках применение червячных передач сокращает длину кинематических цепей, что существенно повышает точность станка в целом. К червячным передачам, которые используются в металлорежущих станках, выдвигаются высокие требования к долговечности, высокой кинематической точности, тонком регулировании зазора, компенсации износа и др. Синтез новых червячных передач открывает новые направления и подходы в решении научной задачи повышения точности и долговечности червячных передач для металлорежущих станков.

Особый научный и практический интерес представляет применение в механизмах металлорежущих станков червячных передач с вогнутым профилем витков червяка. Такие передачи известны своей высокой нагрузочной способностью, которая может практически в два раза превышать нагрузочную способность червячных передач с червяками типа *ZA*, *ZI* и др. Этот факт подтверждается характеристиками червячных передач типа *ZT* по ГОСТ 18498, нагрузочная способность которых, благодаря вогнутому профилю червяка, выше, чем у червячных передач других типов при одинаковых условиях эксплуатации.

Применение таких червячных передач в механизмах металлорежущих станков позволит:

– при одинаковых габаритных размерах и передаваемом моменте в сравнении с существующими механизмами повысить долговечность благодаря

меньшим максимальным нормальным напряжениям при контакте выпуклых зубцов червячного колеса и вогнутых витков червяка;

– уменьшить габаритные размеры существующих механизмов за счет более высокой нагрузочной способности.

Однако червячные передачи с вогнутым профилем витка червяка имеют ряд особенностей, влияние которых на точность механической обработки червячных колес и червяков необходимо исследовать. Поэтому исследования инструментального обеспечения для механической обработки звеньев червячных передач с вогнутым профилем витков червяка являются актуальными.

Анализ литературы. Известна червячная передача с вогнутым профилем витка червяка [1], которая синтезирована на основе способа жесткой неконгруэнтной производящей пары (ЖНПП) [2]. Первым элементом ЖНПП является червячная фреза для нарезания эвольвентных колес по ГОСТ 9324, которая используется для нарезания червячного колеса [3]. Вторым элементом ЖНПП является дисковый инструмент, производящая поверхность которого формируется дугами гипербол однополостных гиперболоидов вращения, которые образуются при вращении линейных образующих эвольвентного геликоида червячной фрезы. В соответствии с работой [1] производящие поверхности червячной фрезы и дискового инструмента являются неконгруэнтными.

Механическая обработка червячных колес рассмотренной выше передачи до седьмой степени точности по ГОСТ 1643 осуществляется червячными фрезами по ГОСТ 9324 класса точности А обычных габаритных размеров [1, 3]. Для механической обработки более точных колес в соответствии с рекомендациями [4] необходимо воспользоваться червячными фрезами класса точности АА и ААА с увеличенными габаритными размерами. Увеличение габаритных размеров этих фрез позволяет свести к минимуму органические погрешности их профилирования на базе архимедового или конволютного червяков.

Воспользовавшись фрезой класса точности АА на зубофрезерном станке нормальной точности можно обработать колеса седьмой степени точности [4]. Воспользовавшись фрезой класса точности ААА на зубофрезерном станке повышенной точности можно обработать колеса шестой степени точности, а на зубофрезерном станке высокой точности можно обработать колеса пятой степени точности [4]. Это отвечает требованиям, которые выдвигаются к точности червячных передач механизмов металлорежущих станков, однако на обработке червячного колеса рассматриваемой передачи отражается негативно, поскольку увеличение диаметра червячной фрезы приводит к увеличению межосевого расстояния в соответствующем станочном зацеплении и существенному ослаблению зубьев вследствие большего объема удаленного металла. Таким образом, для повышения точности механической обработки червячного колеса рассмотренной передачи необходимо иное инструментальное обеспечение.

Поскольку обработка червячного колеса ведется на существующем оборудовании [3], то при решении вопроса о повышении точности обработки можно воспользоваться результатами работ [5, 6].

В работе [5] рассмотрено повышение эффективности нарезания цилиндрических зубчатых колес червячными фрезами с разделенным профилем исходного контура. В соответствии с [5] устранение или частичное уменьшение отрицательного влияния на процесс зубообработки факторов, присутствующих в схеме резания червячных фрез стандартной конструкции, возможно за счет увеличения количества стружечных канавок и реек. Это достигается при неизменном внешнем диаметре фрезы уменьшением высоты зубьев и разделением профиля рейки нормального исходного контура по высоте между фрезами для двух последовательных проходов [5]. У фрезы для первого прохода зубья отвечают профилю ножки зубьев рейки нормального исходного контура, а зубья фрезы для второго прохода – головке зубьев профиля нормального исходного контура [5]. Однако в [5] червячные фрезы по ГОСТ 9324 рассматривались по своему прямому назначению, т.е. для обработки эвольвентных зубчатых колес из стали и чугуна, в то время как венцы червячных колес изготавливаются из бронзы. Следовательно, геометрия зуба червячной фрезы, рассмотренной в работе [5], не является оптимальной для нарезания червячных колес.

В работе [6] для обработки червячных колес предлагается воспользоваться разделением профиля рейки нормального исходного контура по высоте на три равные части между червячными фрезами для трех последовательных проходов. У фрезы для первого прохода зубья отвечают профилю ножки зубьев рейки нормального начального контура, а зубья фрезы для третьего прохода отвечают головке зубцов профиля нормального начального контура. Для устранения переходного следа на рабочих поверхностях зубьев червячного колеса на зубьях фрез первого и зубьях фрез второго прохода выполняется перекрытие по высоте зуба $e = 0,25m_0$. Поскольку при обработке вершинным и боковыми лезвиями потоки стружки пересекаются, то для устранения этого отрицательного фактора зубья фрез для первого и второго проходов на вершинах имеют полукруглые канавки, эффективность применения которых известна.

Основной эффект применения червячных фрез с разделенным профилем начального контура проявляется вследствие изменения числа зубьев. Повышение количества зубьев повышает количество профилирующих резцов, вследствие чего точность обработки увеличивается за счет уменьшения огранки профиля зуба червячного колеса [5, 6]. Также повышение количества зубьев фрезы вызывает уменьшение силы резания, что также способствует повышению точности обработки [6]. С другой стороны, увеличение количества зубьев скажется на их геометрии, а особенно на задних углах на боковых режущих лезвиях.

Поскольку вопросы геометрии зубьев червячных фрез с разделенным на три части профилем исходного контура в работе [6] не рассматривались, то необходимо провести соответствующие исследования.

Цель статьи. Целью статьи является исследование геометрии зубьев червячных фрез с разделенным на три части по высоте профилем исходного контура.

Раздел основного материала. Для рассматриваемых фрез, как и для червячных фрез класса точности АА тип 1 по ГОСТ 9324, заменим эвольвентный основной червяк архимедовым червяком.

Передние углы для рассматриваемых фрез назначаются из тех же соображений, что и для стандартных фрез.

Рассмотрим задние углы на вершинной и боковых режущих кромках.

Известно [4], что задние углы на боковых режущих кромках в произвольной точке M можно определить так:

$$\operatorname{tg} \alpha_{bM} = \frac{r_{a0}}{r_{aM}} \operatorname{tg} \alpha_a \sin \alpha_{x0}, \quad (1)$$

где r_{a0} – радиус вершин фрезы, мм; r_{aM} – радиус произвольной точки M на боковой кромке зуба фрезы, мм; α_a – задний угол на вершинной режущей кромке, град. (при обработке бронзы $7 \dots 9^\circ$, а при обработке чугуна и стали $10 \dots 12^\circ$ [4]); α_{x0} – угол профиля задней поверхности, град.

Угол профиля задней поверхности правозаходной фрезы в осевом сечении для левой и правой стороны зуба разный и определяется так [4]:

$$\operatorname{ctg} \alpha_{xR(L)0} = \operatorname{ctg} \alpha_{z0} \mp \frac{Kz_0}{P_z}, \quad (2)$$

где α_{z0} – угол профиля заменяющего архимедова червяка, град.; K – величина затылования, мм; P_z – ход стружечной канавки, мм; z_0 – число зубьев фрезы. Для левозаходных фрез знаки в (2) – противоположные.

Определим максимально теоретически возможное число зубьев рассматриваемой червячной фрезы [4]:

$$z_0 = 360^\circ / \varphi, \quad (3)$$

где φ – угол, который определяется по формуле $\cos(\varphi) = (d_{a0} - h_0) / d_{a0}$, d_{a0} – наружный диаметр, мм; h_0 – высота зуба стандартной фрезы, мм.

Очевидно, что для червячной фрезы с разделенным на три части по высоте профилем исходного контура минимальное число зубьев будет определяться фрезой для первого прохода. Учитывая, что высота зуба фрезы для первого прохода составляет $1/3$ от высоты зуба стандартной фрезы плюс пе-

рекрытие, после математических преобразований (3) получим:

$$z_{0\min} = \frac{360^\circ}{\arccos \left[\frac{d_{a0} - (2h_0/3) - [(h_0/3) + 0,25m]}{d_{a0} - 2h_0/3} \right]} \quad (4)$$

После математических преобразований (1) и (2) получим:

$$\operatorname{tg} \alpha_{bM} = \left(\frac{r_{a0}}{r_{aM}} \operatorname{tg} \alpha_a \right) / \sqrt{1 + \left(\operatorname{ctg} \alpha_{z0} \mp \frac{Kz_0}{P_z} \right)^2} \quad (5)$$

Проводились расчеты значений минимальных боковых задних углов червячных фрез класса точности АА тип 1 исполнение 1 ГОСТ 9324 и расчеты вершинных и минимальных боковых задних углов для червячных фрез с разделенным на три части по высоте профилем исходного контура. Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица.

Результаты расчетов

m ₀ , мм	Червячные фрезы по ГОСТ 9324			Червячные фрезы с разделенным на три части по высоте профилем исходного контура							
	K, мм	z ₀ , шт.	α _b , град	K, мм	z ₀ , шт.	1-й проход		2-й проход		3-й проход	
						α _a , град	α _b , град	α _a , град	α _b , град	α _a , град	α _b , град
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2,5	12	4,66	1,5	12	8,45	2,90	8,27	2,84	8,15	2,80
				1,5	13	9,14	3,15	8,95	3,08	8,82	3,04
				1,5	14	9,83	3,39	9,63	3,32	9,49	3,27
				1	15	7,05	2,42	6,91	2,37	6,81	2,34
				1	16	7,52	2,58	7,36	2,53	7,26	2,49
1,125	2,5	12	3,73	1	17	7,98	2,74	7,82	2,69	7,70	2,65
				2	12	8,97	3,09	8,80	3,03	8,69	2,99
				1,5	13	7,31	2,51	7,17	2,46	7,08	2,43
				1,5	14	7,86	2,70	7,71	2,65	7,62	2,62
				1,5	15	8,42	2,89	8,26	2,84	8,15	2,80
1,25	2,5	12	3,73	1,5	16	8,97	3,09	8,80	3,03	8,69	2,99
				1,5	17	9,52	3,28	9,34	3,22	9,22	3,18
				1,5	18	10,07	3,47	9,88	3,41	9,75	3,36
				2	12	9,00	3,10	8,81	3,03	8,09	2,99
				1,5	13	7,33	2,52	7,18	2,47	7,08	2,43
1,25	2,5	12	3,73	1,5	14	7,89	2,71	7,73	2,65	7,62	2,62
				1,5	15	8,45	2,91	8,27	2,84	8,15	2,80
				1,5	16	9,00	3,10	8,81	3,03	8,69	2,99
				1,5	17	9,51	3,29	9,36	3,22	9,22	3,17
				1,5	18	10,07	3,47	9,88	3,41	9,75	3,36

Продолжение таблицы.

1,375	2,5	12	3,73	2	12	9,03	3,11	8,83	3,04	8,69	2,99
				1,5	13	7,36	2,53	7,19	2,47	7,08	2,43
				1,5	14	7,92	2,72	7,74	2,66	7,62	2,62
				1,5	15	8,48	2,92	8,28	2,85	8,15	2,80
1,5	2,5	12	3,56	1,5	16	9,03	3,11	8,83	3,04	8,69	2,99
				2	12	7,15	2,46	7,01	2,41	6,91	2,37
				2	13	7,74	2,66	7,59	2,61	7,48	2,57
				2	14	8,33	2,86	8,16	2,81	8,05	2,77
				2	15	8,92	3,07	8,74	3,01	8,62	2,97
				1,5	16	7,15	2,46	7,01	2,41	6,91	2,37
				1,5	17	7,60	2,61	7,44	2,56	7,34	2,52
				1,5	18	8,04	2,76	7,88	2,71	7,77	2,67
1,75	3,0	12	3,55	2	12	7,20	2,47	7,03	2,41	6,91	2,37
				2	13	7,79	2,68	7,61	2,61	7,48	2,57
				2	14	8,38	2,88	8,18	2,81	8,05	2,77
				2	15	8,97	3,09	8,76	3,01	8,62	2,96
2	3,0	12	3,55	1,5	16	7,20	2,47	7,03	2,41	6,91	2,37
				2	12	7,24	2,48	7,04	2,42	6,91	2,37
				2	13	7,83	2,69	7,62	2,62	7,48	2,57
				2	14	8,43	2,90	8,20	2,82	8,05	2,77
2,25	3,0	12	3,16	2	15	9,02	3,10	8,78	3,02	8,62	2,96
				2,5	12	8,02	2,75	7,80	2,68	7,66	2,63
				2,5	13	8,67	2,98	8,44	2,90	8,29	2,85
				2	14	7,49	2,57	7,29	2,50	7,16	2,46
2,5	3,0	12	3,155	2	15	8,02	2,75	7,80	2,68	7,66	2,63
				2,5	12	8,06	2,77	7,82	2,69	7,66	2,63
				2,5	13	8,72	3,00	8,46	2,91	8,29	2,85
				2	14	7,53	2,58	7,30	2,51	7,16	2,46
2,75	3,0	12	3,15	2,5	12	8,10	2,78	7,84	2,69	7,66	2,63
				2,5	13	8,76	3,01	8,48	2,92	8,29	2,85
3	4,0	10	3,11	2	14	7,57	2,60	7,32	2,51	7,16	2,46
				3	10	7,19	2,47	6,96	2,39	6,81	2,34
				3	11	7,90	2,71	7,65	2,63	7,48	2,57
				2,5	12	7,19	2,47	6,96	2,39	6,81	2,34
3,25	4,0	10	3,11	2,5	13	7,78	2,67	7,53	2,59	7,37	2,53
				2,5	14	8,37	2,88	8,10	2,78	7,93	2,72
				3,5	10	8,41	2,89	8,12	2,79	7,93	2,72
				3	11	7,93	2,73	7,66	2,63	7,48	2,57
3,5	4,0	10	3,11	3	12	8,64	2,97	8,35	2,87	8,15	2,80
				2,5	13	7,81	2,68	7,55	2,59	7,37	2,53
				3,5	10	8,45	2,90	8,13	2,79	7,93	2,72
				3	11	7,97	2,74	7,67	2,64	7,48	2,57
3,5	4,0	10	3,11	3	12	8,68	2,99	8,36	2,87	8,15	2,80
				2,5	13	7,85	2,70	7,56	2,56	7,37	2,53

Продолжение таблицы.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3,75	4,5	10	3,11	3,5	10	7,50	2,57	7,23	2,48	7,06	2,42
				3,5	11	8,23	2,83	7,95	2,73	7,75	2,66
				3	12	7,71	2,65	7,44	2,55	7,26	2,49
				3	13	8,34	2,87	8,05	2,76	7,85	2,70
4	4,5	10	3,11	3,5	10	7,53	2,58	7,24	2,49	7,06	2,42
				3,5	11	8,27	2,84	7,96	2,73	7,75	2,66
				3	12	7,74	2,66	7,45	2,56	7,26	2,49
				3	13	8,37	2,88	8,06	2,77	7,85	2,70
4,25	4,5	10	3,11	3,5	10	7,56	2,60	7,26	2,49	7,06	2,42
				3,5	11	8,30	2,85	7,97	2,74	7,75	2,66
				3	12	7,77	2,67	7,46	2,56	7,26	2,49
4,5	4,5	10	3,11	3,5	10	7,59	2,61	7,27	2,49	7,06	2,42
				3,5	11	8,34	2,87	7,98	2,74	7,75	2,66
				3	12	7,80	2,68	7,47	2,57	7,26	2,49
5	5,0	10	3,11	4	10	7,80	2,68	7,47	2,57	7,26	2,49
				3,5	11	7,51	2,58	7,19	2,47	6,99	2,40
				3,5	12	8,19	2,81	7,84	2,69	7,62	2,61
5,5	6,0	10	3,33	4,5	10	7,83	2,69	7,50	2,58	7,29	2,50
				4	11	7,66	2,63	7,34	2,52	7,13	2,45
				3,5	12	7,31	2,51	7,01	2,40	6,81	2,34
6	6,0	10	3,33	4,5	10	7,88	2,71	7,52	2,58	7,29	2,50
				4	11	7,71	2,65	7,36	2,53	7,13	2,45
				3,5	12	7,36	2,53	7,02	2,41	6,81	2,34
6,5	6,5	9	3,08	5	9	7,50	2,58	7,15	2,45	6,92	2,38
				4,5	10	7,50	2,58	7,15	2,45	6,92	2,38
				4,5	11	8,24	2,83	7,86	2,70	7,61	2,61
7	6,5	9	3,08	5	9	7,55	2,59	7,17	2,46	6,92	2,38
				4,5	10	7,55	2,59	7,17	2,46	6,92	2,38
				4,5	11	8,29	2,85	7,88	2,71	7,61	2,61
8	7,0	9	3,13	5,5	9	7,89	2,71	7,46	2,56	7,18	2,47
				5	10	7,97	2,74	7,53	2,59	7,26	2,49
9	8,0	9	3,20	6	9	7,69	2,64	7,27	2,50	7,00	2,40
				5,5	10	7,83	2,69	7,40	2,54	7,13	2,45
10	8,5	9	3,17	6,5	9	7,81	2,68	7,36	2,53	7,08	2,43
				6	10	8,00	2,75	7,55	2,59	7,26	2,49
11	9,0	9	3,15	7	9	7,91	2,72	7,44	2,55	7,14	2,45
				7,5	10	8,15	2,80	7,67	2,64	7,37	2,53
12	9,5	9	3,13	7,5	9	7,99	2,75	7,51	2,58	7,20	2,47
				6,5	10	7,70	2,65	7,23	2,48	6,94	2,38
14	10,5	9	3,09	8,5	9	8,14	2,80	7,63	2,63	7,30	2,51
				8	10	8,51	2,93	7,97	2,74	7,63	2,62
16	13,5	8	3,17	10,5	8	8,04	2,77	7,52	2,58	7,19	2,47
				9,5	9	8,18	2,81	7,65	2,63	7,32	2,51
				8,5	10	8,13	2,80	7,60	2,61	7,27	2,50

Окончание таблицы.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
18	15,0	8	3,16	11,5	8	7,92	2,72	7,40	2,54	7,07	2,43
				10,5	9	8,13	2,80	5,60	2,61	7,26	2,49
				9,5	10	8,18	2,81	7,64	2,62	7,30	2,51
20	16,0	8	3,18	12	8	7,85	2,70	7,31	2,51	6,97	2,38
				11	9	8,09	2,78	7,53	2,59	7,18	2,47

Анализ результатов исследований, приведенных в таблице, показывает, что вершинные задние углы близки к оптимальным значениям, рекомендованным для обработки бронзовых венцов червячных колес, а боковые задние углы минимальны у фрезы для третьего прохода и находятся в пределах $2,33^\circ \dots 3,27^\circ$, что является приемлемым.

Выводы. Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать вывод, что:

1. Число зубьев червячных фрез с разделенным на три части по высоте профилем исходного контура существенно превышает соответствующий параметр, рекомендуемый для стандартных червячных фрез по ГОСТ 9324.

2. Вершинные задние углы зубьев червячных фрез с разделенным на три части по высоте профилем исходного контура близки к оптимальным значениям, рекомендованным для обработки бронзовых венцов червячных колес, а боковые задние углы минимальны у фрезы для третьего прохода и находятся в пределах $2,33^\circ \dots 3,27^\circ$, что является приемлемым.

Результаты исследований можно применить при проектировании червячных фрез с разделенным на три части по высоте профилем исходного контура для обработки червячных колес червячных передач с вогнутым профилем витка червяка.

Список литературы: 1. *Надеин В.С., Ковришкин Н.А.* Производящая пара для нарезания червячных передач с вогнутым профилем червяка // Проблемы качества и долговечности зубчатых передач и редукторов: Тр. междунар. научн.-техн. конф. – Харьков: ХГПУ. – 1997. – С.68–74. 2. *Давыдов Я.С.* Образование сопряженных поверхностей в зубчатых передачах по принципу жесткой неконгруэнтной производящей пары // Вестник машиностроения. – 1963. – №2. – С.9–13. 3. *Безруков В.И., Надеин В.С.* Общий случай нарезания червячного колеса эвольвентной червячной фрезой // Совершенствование конструкций машин и методов обработки деталей / Сб. научн. трудов ЧПИ. – Челябинск: ЧПИ. – 1975. – № 164. – С.9–20. 4. Справочник инструментальщика / *И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.*; Под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. – 846с. 5. *Грицай І.С.* Основи підвищення ефективності процесу нарізання циліндричних зубчатих коліс черв'ячними фрезами: Дис. докт. техн. наук. – Львів, 2003. – 425с. 6. *Ковришкин М.О., Садченко О.І.* Підвищення точності механічної обробки черв'ячних коліс черв'ячних передач з угнутим профілем витка черв'яка // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї-наука-виробництво. Матеріали сьомої Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції / Під ред. Копитчука М.Б. та ін. – Одеса: ОНПУ, 2007. – С.54–55.

Поступила в редколлегию 20.05.08