

УДК 621.914.6, 621.833

DOI: 10.12737/24549

**С.А. Лагутин**, к.т.н.,

(ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения»  
144005, г. Электросталь, Московской обл., ул. Красная, 19),

**А.И. Сандлер**, к.т.н.

(ООО «СЭЛЭКШЕН», 127540, Москва, ул. Дубнинская, 12-1- 269)

E-mail: lagutin@eztm.ru , sandli@aha.ru

## Построение функционально-ориентированной технологии второго порядка при обработке зубчатых колес

*Функционально-ориентированные технологии зубообработки цилиндрических зубчатых колес следует дополнить технологиями второго порядка, которые повышают качество обработки и рациональность эксплуатации зуборезного инструмента. Выявленное искажение производящей поверхности червячной фрезы, вследствие переточек ее передней поверхности, при обработке колеса компенсируются корректировкой угла установки оси многократно переточенной фрезы.*

**Ключевые слова:** зубчатые колеса; зуборезная фреза; зубообработка; заточка.

**S.A. Lagutin**, Can. Eng.,

(Publ. Corp. "Electrostal Plant of Heavy Engineering", 19, Krasnaya Str, Electrostal, 144005 Moscow Region)

**A.I. Sandler**, Can. Eng.

("SELECTION" Co. Ltd., 12-1-269, Dubninskaya Str, 127540, Moscow)

## Formation of functionally-directed technology of the second order at cog-wheel working

*It is shown in the paper that the functionally-directed technologies of tooth working in spur gears should be supplemented with the technologies of the second order which ensure machining quality increase and an efficient operation of gear-milling tools. In particular, there is investigated the producing surface distortion of a hob caused by regrinding its front surface. It is shown that for the compensation of this distortion at wheel machining it is expedient to correct an installation angle of the axis in a miller regrinded repeatedly. The conditions are determined (types and grades of accuracy for millers) at which such a correction is necessary.*

**Keywords:** cog-wheels; gear-milling cutter; tooth-processing; grinding (sharpening).

Функционально-ориентированные технологии – технологии, проектируемые с учетом функционального назначения или обеспечения эксплуатационных свойств обрабатываемых рабочих поверхностей деталей машин [1]. Применительно к изготовлению деталей и узлов различных зубчатых передач, где требуется использование наукоемкого инструмента, необходимо дополнять функционально-ориентированными технологиями второго порядка, которые содержат условия рациональной эксплуатации такого инструмента и указания по корректировке его наладки на обрабатывающем станке. Рассмотрим вопросы построения технологии второго порядка зубофрезерования цилиндрических зубчатых колес, связанной с эксплуатационными переточ-

ками червячных фрез.

Рассмотрим вопросы построения технологии второго порядка зубофрезерования цилиндрических зубчатых колес, связанные с эксплуатационными переточками червячных фрез.

При зубофрезеровании цилиндрических зубчатых колес по мере переточек червячной фрезы наружный и делительный диаметры ее производящей поверхности уменьшаются. Вследствие этого возникают погрешности профиля производящей поверхности фрезы в части угла профиля производящей рейки и толщины ее зубьев. Рассмотрим процесс их образования и воздействия на профиль обрабатываемого зубчатого колеса.

Как известно, производящей рейкой чер-

вячной фрезы при зубофрезеровании цилиндрических зубчатых колес является нормальное сечение винтовой поверхности (производящего червяка), которое в новой фрезе, как правило, совпадает с винтовой передней поверхностью зубьев. Угол профиля производящей рейки  $\alpha_1$  соответствует углу профиля нарезаемого колеса на его делительном цилиндре и связан с углом  $\alpha_{x0}$  профиля витка производящего червяка в его осевом сечении известной зависимостью:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \operatorname{tg} \alpha_{x0} \cos \gamma, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – угол подъема производящей поверхности червячной фрезы на цилиндре, касательном к делительному цилиндру нарезаемого колеса.

Применительно к червячным фрезам для цилиндрических зубчатых колес, в этой зависимости величина  $\alpha_{x0}$  постоянная, а  $\gamma$  – переменная. Связано это с тем, что задние поверхности зубьев фрезы изготавливают методом радиального затылования [2] с одинаковым спадом затылка на наружном цилиндре и на боковых сторонах.

Из-за этого производящую рейку с каждой переточкой фрезы, для компенсации изменения размеров зубьев фрезы, приближают к оси фрезы, и диаметр цилиндра производящего червяка, с которым касается делительный цилиндр нарезаемого колеса, уменьшается. Соответственно угол подъема производящей поверхности фрезы на этом же цилиндре изменится – увеличится. Зависимость изменения  $\Delta\alpha_1$  угла профиля производящей рейки от изменения  $\Delta\gamma$  угла подъема производящей поверхности определим в виде:

$$\Delta\alpha_1 = \frac{d\alpha}{d\gamma} \Delta\gamma = -(\sin \alpha_1 \cos \alpha_1 \operatorname{tg} \gamma) \Delta\gamma. \quad (2)$$

Соответственно, линейная погрешность  $\Delta f_{f0}$  профиля производящей рейки, вносимая изменением  $\Delta\alpha_1$  угла  $\alpha_1$  составит:

$$\Delta f_{f0} = -2m \sin \alpha_1 \operatorname{tg} \gamma \Delta\gamma. \quad (3)$$

Физическим смыслом изменения  $\Delta\gamma$  является разность между углом установки оси фрезы на станке и изменяющимся в процессе переточек зубьев фрезы углом  $\gamma$  подъема производящей поверхности, на которой после очередной переточки располагаются режущие кромки зубьев. Знак «минус» в (2) показывает: при увеличении угла  $\gamma$  ( $\Delta\gamma > 0$ ), что имеет место в данном случае, угол профиля производящей рейки уменьшается ( $\Delta\alpha_1 < 0$ ), и тем больше,

чем большее число переточек фрезы осуществляют в процессе ее эксплуатации. Соответственно, в (3) знаком «минус» обозначено направление отклонения профиля производящей поверхности фрезы («в тело» зуба фрезы) при замере от головки зуба к ножке.

Рассмотрим влияние выявленных дополнительных погрешностей.

Во-первых, уменьшение угла профиля производящей рейки приведет к нарезанию зубчатого колеса с увеличенным шагом зацепления, что допустимо в определенных пределах для ведущего колеса зубчатой пары [3] и недопустимо для ведомого колеса, поскольку способствует неравномерности вращения последнего, увеличению вибраций и шума работающей пары.

Во-вторых, как следствие, линейное увеличение погрешности профиля зубьев производящей рейки фрезы увеличивает погрешность параметра  $f_{f0}$  точности профиля производящей рейки для обработки колеса соответствующей степени точности. Единственной возможностью устранить возникающие погрешности профиля производящей рейки является корректировка угла установки оси фрезы на зубофрезерном станке увеличением его в соответствии со значением  $\Delta\gamma$ .

В этой связи необходимо определиться с моментом изменения размера диаметра (радиуса) делительного цилиндра переточенной фрезы, когда целесообразно скорректировать изменение угла подъема производящей поверхности фрезы путем изменения угла установки оси червячной фрезы на зубофрезерном станке при обработке цилиндрических зубчатых колес. А также определить необходимость изменения угла наклона передней поверхности зубьев фрезы, поскольку угол наклона передней поверхности зубьев переточенной фрезы на уменьшенном делительном диаметре производящей поверхности, если переточки производить с такой же наладки, что и заточку новой фрезы, будет отличаться от угла подъема производящей поверхности.

Угол  $\gamma$  подъема производящей поверхности червячной фрезы на цилиндре, касательном к делительному цилиндру нарезаемого колеса, определяем известным выражением:

$$\gamma = \operatorname{arctg} (p/r_0), \quad (4)$$

где  $p = \pi m z_0 / 2\pi = 0,5mz_0$  – винтовой параметр производящей поверхности;  $r_0$  – радиус делительного цилиндра производящей поверхности;  $m$  – модуль;  $z_0$  – число заходов производящей поверхности.

Величину  $\Delta\gamma$  изменения угла  $\gamma$  подъема производящей поверхности из-за изменения радиуса делительного цилиндра определим по формуле

$$\Delta\gamma = \frac{d\alpha}{d\gamma} \Delta r_0 = -\Delta r_0 p / (r_0^2 + p^2). \quad (5)$$

Поскольку при переточках фрезы по передней поверхности зубьев радиус делительного цилиндра уменьшается, и, соответственно, величина  $\Delta r_0$  отрицательна, то можно записать (5) в виде:

$$\Delta\gamma = |\Delta r_0| p / (r_0^2 + p^2). \quad (6)$$

Таким образом угол подъема производящего червяка фрезы и, следовательно, угол установки оси фрезы на зубофрезерном станке должен увеличиться на ту же величину  $\Delta\gamma$ .

Величину изменения  $\Delta r_0$  радиуса  $r_0$  делительного цилиндра определим как спад затылованной поверхности на угле поворота, соответствующему снятому припуску  $a_s$  при переточке фрезы:

$$|\Delta r_0| = a_s K z_p / (2\pi r_0) = a_{as} K z_p / (2\pi r_{a0}), \quad (7)$$

где  $K$  – спад затылка на одном угловом шаге зубьев;  $z_p$  – число зубьев фрезы в ее торцевом сечении (число стружечных канавок);  $a_{as}$  – припуск на наружном цилиндре фрезы, снимаемый при переточках;  $r_{a0}$  – радиус наружного цилиндра фрезы, определяемый из величины соответствующего диаметра  $d_{a0}$  по ГОСТ 9324-80.

Примем во внимание следующее:

– выражение  $K z_p / (2\pi r_{a0})$  определяет функцию тангенса заднего угла зубьев на наруж-

ном цилиндре фрезы, который регламентирован ГОСТ 9324-80 значениями 9...12°. Среднее значение этого диапазона в функции  $\text{tg}$  составляет 0,185;

– радиус  $r_0$  делительного цилиндра фрезы, или цилиндра, касательного к делительному цилиндру нарезаемого колеса, относительно диаметра  $d_{a0}$  наружного цилиндра фрезы определяется по формуле  $r_0 = 0,5 (d_{a0} - 2,5 m)$ ;

– значение числа  $z_0$  заходов производящего червяка для чистовых фрез по ГОСТ 9324-80 составляет 1.

С учетом изложенного из (6) и (7) определим  $\Delta\gamma$  в общем виде:

$$\Delta\gamma = 0,37 a_{as} / [m + (d_{a0} - 2,5 m)^2 / m]. \quad (8)$$

Реализуемая на зубофрезерном станке величина  $\Delta\gamma$  корректировки угла поворота инструментального суппорта соответствует круговой цене деления нониуса и на большинстве моделей зубофрезерных станков составляет не точнее 5', или 0,0014544.

Задавшись этим значением  $\Delta\gamma$ , и учитывая  $d_{a0} \gg m$ , определим величину  $a_{as}$ , при достижении которой целесообразно изменить наладку зубофрезерного станка вводом корректировки (увеличением) угла установки оси фрезы:

$$a_{as} = \Delta\gamma (d_{a0} - 2,5 m)^2 / 0,37 m \approx \approx 0,004 (d_{a0} - 2,5 m)^2 / m. \quad (9)$$

В табл. 1 приведен расчет  $a_{as}$  для фрез по ГОСТ 9324-80 и сравнение с длиной  $l_s$  шлифованной части зубьев фрезы.

### 1. Расчет съема припуска при переточках фрезы для минимальной коррекции угла установки фрезы $\Delta\gamma = 5'$

N п/п	m, мм	Тип 1		Сравнение $a_{as}$ и $l_s$	Тип 2		Сравнение $a_{as}$ и $l_s$
		$d_{a0}$ , мм	$a_{as}$ , мм		$d_{a0}$ , мм	$a_{as}$ , мм	
1	1	71	18,77	> $l_s$	40	5,62	$\approx l_s$
2	2	90	14,45		63	6,73	> $l_s$
3	3	112	14,55		80	7,01	$\approx l_s$
4	4	125	13,22		90	6,4	$l_s = 9,5$
5	5	140	13,00		100	6,12	$l_s = 6,9$
6	6	160	14,02		112	6,27	$l_s = 7,8$
7	8	180	12,80		125	5,51	$l_s = 9,6$
8	10	180	9,61	$\approx l_s$	150	6,25	$l_s = 11,6$
9	12	-			170	6,53	$l_s = 13,1$
10	16	-			212	7,4	$l_s = 18,4$
11	20	-			250	8,0	$l_s = 21,7$

Анализ приведенного расчета показал, что для фрез типа 1 величина  $a_{as}$  снятия минимально необходимого припуска для измене-

ния угла установки оси фрезы превышает либо длину зуба фрезы, либо длину  $l_s$  его шлифованной части. Для фрез типа 2 реализация

корректировки угла установки оси фрезы возможна при зубонарезании колес модулем от 4 мм и более. Практически такая корректировка потребуется 1 раз при обработке колес модулем 4...12 мм, и 2 корректировки – для модулей 16...20 мм.

Очевидно, что величину  $a_{as}$  съема металла при переточках необходимо контролировать от начала эксплуатации фрезы. Для этого целесообразно паспортизовать длину зуба новой фрезы – замер штангенциркулем от передней поверхности зуба до затылка зуба в следующей стружечной канавке обеспечивает достаточную точность этого размера – и контроли-

ровать изменение этого размера по мере проведения переточек зубьев (из-за их периодического затупления) для восстановления режущих свойств фрезы.

Определим количество переточек червячной фрезы от начала ее эксплуатации до момента необходимости корректировки значения угла установки оси инструментального суппорта зубофрезерного станка.

Как известно, критерием затупления зубьев фрезы является износ зубьев по задней поверхности, который не должен превышать значений, указанных в таблице 7 ГОСТ 9324-80, а именно (см. табл. 2).

**2. Значения предельной ширины площадки износа зубьев червячных фрез, как критерий затупления и необходимости переточки**

$m$ , мм	Предельно допустимый износ, мм (по табл. 7 ГОСТ 9324-80)	Предельно допустимый износ, мм, исходя из опыта эксплуатации фрез
4 ... 5	0,3	0,3
6 ... 8	0,3 (до $m = 10$ )	0,4
10 ... 12	0,5 ( $m > 10$ до 14)	0,5
14 ... 20	0,6 ( $m > 14$ до 25)	0,6

Для гарантированного обновления режущих кромок зубьев припуск на переточку  $a_{s1}$  увеличивают на 0,1мм относительно ширины площадки износа. Количество  $n_s$  переточек до момента смены наладки зубофрезерного станка определяем по формуле

$$n_s = a_{as} / a_{s1}. \tag{10}$$

В табл. 3 приведены значения расчетного количества переточек фрез до момента смены наладки угла установки оси фрезы на станке. Также приведены значения уменьшения  $\Delta r_{a0}$  радиуса наружного и, соответственно, радиуса  $\Delta r_0$  делительного цилиндра производящей поверхности фрезы.

**3. Расчет количества  $n_s$  переточек фрез с одной наладкой угла установки оси фрезы**

$m$ , мм	$d_{a0}$ , мм	$a_{as}$ , мм	$a_{s1}$ , мм	$n_s$	$\Delta r_{a0} = \Delta r_0$ , мм
4	90	6,4	0,4	16	1,18
5	100	6,1	0,4	15	1,11
6	112	6,3	0,5*	12	1,11
8	125	5,5	0,5*	11	1,02
10	150	6,3	0,6*	10	1,11
12	170	6,5	0,6	10	1,11
16	212	7,4	0,7	10	1,30
20	250	8,0	0,7	11	1,42

\* – указанные значения приняты, исходя из практики эксплуатации фрез [4].

Для выявленных типоразмеров червячных

фрез уточним значения дополнительных погрешностей  $\Delta f_{f0}$  профиля производящей рейки фрезы и, соответственно, эвольвентного профиля обрабатываемого зубчатого колеса, вносимых переточками до корректировки угла установки оси фрезы.

В табл. 4 представлены значения  $\Delta f_{f0}$ , мкм, рассчитанные по формуле (3) при значениях изменения угла подъема производящей поверхности фрезы  $\Delta \gamma$ , равных 5' и 10'.

**4. Расчет величин искажений профиля производящей рейки при зубонарезании колес, вносимых изменением угла подъема производящей поверхности червячной фрезы**

$m$ , мм	4	5	6	8	10	12	16	20	
$\Delta f_{f0}$ , мкм, для	$\Delta \gamma = 5'$	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0
	$\Delta \gamma = 10'$	0,4	0,6	0,8	1,1	1,6	2,0	3,5	4,0

Приведенные значения дополнительно образовавшихся погрешностей  $\Delta f_{f0}$  направлены в минус (в «тело» профиля зуба производящей рейки), но достаточно малы.

Если сравнивать разность допусков на погрешность профиля фрезы и зубчатого колеса по ГОСТ 9324-80 и ГОСТ 1643-81, и принимая за точку отсчета, что фрезы класса ААА применяют для обработки колес 5-й степени точности, то эта разность в пользу погрешности профиля зубчатого колеса поглощает об-

разную погрешность производящей рейки для червячных фрез классов точности А, В, С, Д при некомпенсации угла установки фрезы до 10'.

Для фрез классов точности ААА и АА крупных модулей (12 мм и более) такую компенсацию путем корректировки угла установки фрезы (угла установки инструментального суппорта зубофрезерного станка) проводить целесообразно.

Уменьшение радиуса (диаметра) делительного цилиндра (на величины  $\Delta r_0$  производящего червяка фрезы, приведенные в табл. 3) требует увеличения угла наклона винтовой передней поверхности зубьев на этом же цилиндре. Это увеличение составит практически удвоенную величину  $\Delta\gamma$  увеличения угла подъема производящей поверхности, то есть порядка 10'.

Реализация этого изменения приведет к соответствующему уменьшению хода винтовых передних поверхностей зубьев фрезы и нарастающему на длине фрезы (и, следовательно, в зоне профилирования зубьев колеса) изменению размера ширины зубьев производящей рейки, что очевидно недопустимо по условиям профилирования зубьев обрабатываемых эвольвентных колес.

Отметим, что разработчики ГОСТ 9324-80 предусмотрели некоторое расчетное уменьшение делительных диаметров червячных зуборезных фрез, назначив соответственно увеличенные углы наклона и уменьшенные размеры хода стружечных канавок.

### Заключение.

Функционально-ориентированные технологии изготовления деталей и узлов разнообразных зубчатых передач, где требуется применение наукоемкого инструмента, необходимо дополнять технологиями второго порядка, которые содержат результаты исследований в повышении качества обработки и решении вопросов рациональной эксплуатации такого инструмента. В частности, целесообразность корректировки угла установки оси многократно переточенной червячной фрезы при зубофрезеровании эвольвентных зубчатых колес определяется необходимостью компенсации «ухода» (вследствие переточек) профиля производящей поверхности фрезы в части угла профиля производящей рейки и толщины ее зубьев.

1. Подобная корректировка возможна только для фрез типа 2 (ГОСТ 9324-80) с уменьшенным диаметром, с модулями от 4 мм и более.

2. Корректировка установки оси фрезы определяется возможностью отсчета поворота инструментального суппорта - не точнее 5 мин (наиболее распространенная точность отсчета нониуса шкалы поворота).

3. Для фрез с модулями 4...10 мм возможна только одна корректировка (через, соответственно, 16...10 промежуточных переточек - табл. 3), для фрез с модулями 12...20 мм целесообразны две корректировки - через каждые 10-11 переточек. В табл. 3 указаны практические рекомендации по определению момента, в который целесообразна корректировка наладки угла установки фрезы на станке.

4. С точки зрения исключения внесения ощутимых для эксплуатации зубчатых пар дополнительных погрешностей в параметры точности изготовления зубчатых колес, эти корректировки необходимо учитывать для червячных фрез классов точности ААА и АА модулей 12 мм и более при зубонарезании колес 5-6-й степеней точности.

5. Корректировка угла наклона передней поверхности зубьев и хода стружечной канавки зубьев фрезы, независимо от количества переточек, недопустима по условиям профилирования зубьев обрабатываемых эвольвентных колес.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов, А.Н., Михайлова, Е.А. Научно-технические функционально-ориентированные технологии в машиностроении // Научно-технические технологии в машиностроении. - 2011. - №1(01). - С. 8-18.
2. Лагутин, С.А., Сандлер, А.И. Шлифование винтовых и заточенных поверхностей. - М.: Машиностроение, 1991. - 12с.
3. Островский, Г.Н., Гушин, В.Г. Прямоугольная цилиндрическая передача с разнонаправленными отклонениями шага зацепления у зубчатых колес // Известия вузов. Машиностроение. - 1980. - №3. - С. 54-57.
4. Овумян, Г.Г. Адам, Я.И. Справочник зубореза: 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1983. - 223 с.

### REFERENCES

1. Mikhailov, A.N., Mikhailova, E.A. Science intensive functionally-directed technologies in mechanical engineering // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. - 2011. - №1(01). - pp. 8-18.
2. Lagutin, S.A., Sandler, A.I. *Grinding of Spiral and Relief Surfaces*. - M.: Mechanical Engineering, 1991. - pp. 12.
3. Ostrovsky, G.N., Gushchin, V.G. Spur gear with multidirectional deviations of gears mesh pitch // *College Proceedings*. Mechanical Engineering. - 1980. - №3. - pp. 54-57.
4. Ovumyan, G.G. Adam, Ya.I. *Reference Book of Gear-Cutting Machine*: 2-d Ed. revised and supplemented. - M.: Mechanical Engineering, 1983. - pp. 223.

Рецензент д.т.н. В.В. Клепиков