

УДК 621.833,621.914.6

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-29-38

Технология затылования зуборезных червячных фрез

А. И. Сандлер, кандидат технических наук, ООО «СЭЛЭКШЕН», Москва, Россия

Затылованная поверхность боковой стороны зубьев червячной фрезы – это аналог винтовой поверхности с углом подъема, увеличенным для одной и уменьшенным для другой стороны зуба относительно угла подъема производящей поверхности. Основные недостатки действующей технологии затылования: искажение профиля производящей поверхности в ходе переточек фрез для восстановления режущих свойств инструмента, зависимость наладки процесса затылования от диаметра шлифовального круга и высокая трудоемкость достижения требуемой точности профиля производящей рейки фрезы.

Предложено изготавливать боковые поверхности зубьев фрезы как эвольвентные, так как теоретически точная эвольвентная винтовая поверхность может быть получена шлифованием при параллельных осях шлифовального круга с прямолинейным профилем и шлифуемого изделия. Приведен порядок расчета параметров фрезы и процесса затылования. Разработана методика расчета органической погрешности получаемого профиля производящей рейки фрезы. Определен основной параметр предварительного затылования фрезы – спад затылка зуба на угловом шаге фрезы в зависимости от длины шлифованной части зуба и припуска на шлифование. Исследованы и определены параметры фрезы и процесса затылования, исключаящие недопрофилирование затылуемых поверхностей. Приведены примеры расчетов применительно к изготовлению прецизионных фрез класса точности ААА.

Ключевые слова: червячная фреза, шлифование, радиальное затылование, затылованная поверхность зубьев, зубчатые колеса.

Введение

Боковые поверхности зубьев червячных фрез для обработки цилиндрических зубчатых колес (ГОСТ 9324–80 «Фрезы червячные чистовые однозаходные для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем. Технические условия») обрабатывают шлифовальным кругом методом радиального затылования, при котором вектор движения затылования направлен перпендикулярно оси обрабатываемой фрезы.

В практике как отечественной инструментальной промышленности, так и за рубежом утвердился метод обработки боковых сторон зубьев с углом установки оси шлифовального круга, равным углу подъема производящей поверхности фрезы на делительном цилиндре. Основным недостатком такого метода состоит в том, что угол наклона оси шлифовального круга не совпадает ни с одним из углов подъема боковых поверхностей зуба, из-за чего фактические линии контакта боковых поверхностей шлифовального круга и шлифуемых поверхностей зубьев (характеристики) находятся в стороне от межосевого перпендикуляра осей круга и фрезы и являются пространственными кривыми. Точность профиля образующей поверхности зуба и его режущей кромки для каждой из сторон зубьев обеспечивается при этом методом мно-

гократной подгонкой каждого из обоих профилей круга по углу и кривизне при правке. При серийном производстве на инструментальных заводах полученные таким образом профили круга, обеспечивающие требуемую точность обработки, как правило, переносят на стальной накатник, которым в дальнейшем производят обновление рабочих поверхностей круга. Однако для использования накатника на оправке, устанавливаемой в центры станка, необходимо менять расположение оси круга, устанавливая ее параллельно оси центров станка, и затем вновь восстанавливать наладку станка для затылования.

Таким методом формируются профили шлифующих поверхностей круга, обеспечивающие прямолинейность режущих кромок производящей поверхности новой фрезы вблизи передней поверхности зубьев. Но при движении затылования, направленном к оси фрезы, профиль задней поверхности зуба на меньших радиусах цилиндров фрезы, где угол подъема обрабатываемой поверхности увеличивается, уже не удовлетворяет этому условию. В этой связи при периодических переточках зубьев по передней поверхности профиль их режущих кромок изменяется с накоплением числа переточек как по углу профиля, так и по его кривизне. Эта погрешность профиля зуба увеличивается с увеличением модуля фрез

и становится существенным фактором для фрез с модулями более 4 мм [1].

Сочетание параметров червячных фрез (модуль, наружный и делительный диаметры, число стружечных канавок, спад затылка на наружном цилиндре) в ГОСТ 9324–80 сформировано для решения двух основных задач.

Во-первых, нормальный задний угол зубьев на прямолинейном профиле режущей кромки должен быть обеспечен не менее 4° . Из-за этого для всех типоразмеров фрез типа 1 (прецизионные, класс точности ААА), ряда значений фрез типа 2 (модулей от 1 до 6,5 мм включительно) и фрез типа 3 (исполнение 1 до модуля 14 мм и исполнение 2 до модуля 10 мм) затылованная поверхность зуба, где угол подъема меньше угла подъема производящей поверхности вырождается в аналог винтовой поверхности противоположного направления, а именно: у правозаходных фрез левая сторона зубьев вырождается в левую винтовую поверхность, а правая сторона зубьев у левозаходных фрез – в правую. Причем чем меньше модуль фрезы, тем это явление более ярко выражено. Этот фактор опасен врезанием наружного диаметра или затылюющей поверхности круга в режущую кромку следующего зуба.

Во-вторых, для минимизации погрешности профиля шлифуемой поверхности зубьев при использовании конического шлифовального круга в стандарте предусмотрены весьма большие наружные диаметры фрез. Объясняется это тем, что при шлифовании винтовых и затылованных поверхностей коническим кругом профиль поверхности получается выпуклым, и стрелка выпуклости (отклонение профиля от прямой) тем больше, чем больше угол подъема шлифуемой поверхности и высота (модуль) зуба. Разработчики стандарта учли, что увеличение наружного диаметра фрез с увеличением модуля как раз способствует уменьшению этой органической погрешности затылования.

При формировании точностных характеристик фрез, в частности по параметру «профиль зуба», разработчики ГОСТ 9324–80 опирались главным образом на завершённые к тому времени (до 1980 г.) исследования по шлифованию винтовых и затылованных поверхностей Лашнева С. И., Литвина Ф. Л., Цепкова А. В., Фомина В. Е., Гречишников В. А., Кирсанова Г. Н., а также практику применения радиального затылования зубьев червячных фрез отечественными инструментальными заводами. На тот момент в их распоряжении отсутствовали методики расчета погрешности профиля затылован-

ной поверхности, разработкой которых занимались позднее другие исследователи. Вопросы изменения профиля затылованных поверхностей зубьев и производящей поверхности фрезы в целом по мере переточек червячных фрез находились также в процессе изучения, в связи с чем остался открытым вопрос выбора в качестве задней поверхности зуба фрезы такого типа, который был бы наименее подвержен изменениям угла и кривизны профилей боковых поверхностей зубьев в процессе радиального затылования и, соответственно, в процессе переточек.

Совершенствованием конструкции и методов затылования зубьев червячных фрез для нарезания зубчатых колес в последние годы занимаются многие авторы [2–9]. В частности выявлено, что наибольшее влияние на изменение профиля затылованной поверхности оказывает увеличение разности угла подъема затылованной поверхности на текущем диаметре с углом установки (наклона) оси шлифовального круга к горизонтальной плоскости.

Следующим фактором, влияющим на изменение профиля шлифуемой поверхности зуба, является кривизна линии ее контакта с поверхностью круга, которая при изменении межосевого расстояния в процессе затылования также изменяется. Поэтому профили затылованной поверхности вблизи режущей кромки зубьев у новой фрезы и у фрезы с переточенными по передним поверхностям зубьями имеют различие тем большее, чем больше переточек проведено в процессе эксплуатации фрезы, а также чем больше высота зубьев и углы подъема затылованных поверхностей зубьев и, соответственно, производящей поверхности фрезы. Поэтому актуально боковые затылованные поверхности зубьев однозаходных фрез для зубчатых колес профилировать таким образом, чтобы указанные выше недостатки можно было либо исключить, либо свести к минимуму.

В фундаментальной монографии Ф. Л. Литвина «Теория зубчатых зацеплений» (М.: Наука, 1968) показано, что теоретически точную эвольвентную винтовую поверхность получают ее шлифованием при параллельных осях изделия (витка червяка) и шлифовального круга с прямолинейным профилем.

Угол осевого профиля шлифовального круга при этом должен быть равен углу подъема винтовой поверхности на ее основном цилиндре. Прямая линия контакта шлифующей поверхности круга и шлифуемой поверхности изделия находится в осевом сечении круга и проходит

касательно к основному цилиндру шлифуемой поверхности; соответственно, профиль шлифуемой винтовой поверхности в любом сечении, касательном к основному цилиндру, остается прямым независимо от диаметра шлифовального круга. Если использовать в качестве затылованных поверхностей зубьев именно такие поверхности, то мы получим постоянство прямолинейного профиля зуба фрезы в сечении, касательном к ее основному цилиндру, на всем протяжении рабочего хода затылования и, следовательно, постоянство профиля осевого сечения затылованной поверхности и режущих кромок зубьев независимо от числа переточек фрезы.

Кроме того, затылование при параллельных осях круга и фрезы позволяет производить обновление рабочей поверхности круга стальным накатником на оправке без перенастройки угла установки оси круга.

Целью исследования является разработка процесса затылования эвольвентных боковых поверхностей зубьев червячных фрез для зубчатых колес и методов расчета параметров такой червячной фрезы – конструктивных, технологических и точностных.

Параметры радиального затылования зубьев червячных фрез

Производящую поверхность фрезы образуют режущие кромки зубьев фрезы, которые получены пересечением передней винтовой поверхности зубьев и их боковых затылованных поверхностей. Затылованная поверхность боковой стороны зубьев червячной фрезы – это аналог винтовой поверхности с углом подъема, увеличенным для одной стороны зуба и уменьшенным для другой стороны зуба относительно угла подъема производящей поверхности фрезы.

Основные параметры производящей поверхности фрезы, регламентированные ГОСТ 9324–80, задаются в нормальном сечении, совпадающем с производящей рейкой нарезаемого колеса. К ним относятся: модуль m_0 , угол профиля рейки $\alpha_0 = 20^\circ$, высота головки зубьев $h_0 = 1,25m_0$ и радиусы закругления головки и впадины зубьев. Также регламентированы стандартом (в том числе обязательным Приложением № 1) наружный диаметр d_{a0} фрезы и число z_0 стружечных канавок (число зубьев в торцевом сечении фрезы). Остальные параметры фрезы, в том числе такие важные, как делительный диаметр d_{m0} фрезы, величина K спада затылка зуба на угловом шаге фрезы, угол γ_{m0} подъема витка производящей поверхности на делительном цилиндре фрезы, угол λ_{m0} наклона стружечных канавок на

том же цилиндре, ход P_z винтовой стружечной канавки, указаны как рекомендованные (Приложение 2), что оставляет возможность для их оптимизации исходя из условий процесса затылования. Расчет делительного диаметра d_{m0} новой фрезы производится обычно по формуле

$$d_{m0} = d_{a0} - 2h_0. \quad (1)$$

Однако разработчики стандарта для последующего расчета хода P_z стружечной канавки (винтовой передней поверхности зубьев) рекомендуют ввести поправку на изменение (уменьшение) диаметра d_{m0} из-за уменьшения наружного диаметра d_{a0} вследствие периодических заточек фрезы по передней поверхности. При $h_0 = 1,25m_0$ и допустимом уменьшении высоты зуба фрезы на $(0,25 \dots 0,26)m_0$ для равномерного распределения погрешности хода передней винтовой поверхности у новой и полностью сточенной фрезы формула (1) примет вид

$$d_{m0} = d_{a0} - (2,75 \dots 2,76)m_0. \quad (1a)$$

Угол γ_{m0} подъема витка производящей поверхности на делительном цилиндре для однозаходных фрез определяется из выражения

$$\sin \gamma_{m0} = m_0 / d_{m0}. \quad (2)$$

Угол λ_{m0} наклона винтовой передней поверхности на делительном цилиндре принимается равным углу γ_{m0} подъема витка на делительном цилиндре фрезы, и величина хода P_z винтовой стружечной канавки определяется по формуле

$$P_z = \pi d_{m0} / \operatorname{tg} \lambda_{m0}. \quad (3)$$

Для нахождения параметров затылованных поверхностей зубьев фрезы определим сначала осевой угол α_{0x} профиля производящей поверхности

$$\operatorname{tg} \alpha_{0x} = \operatorname{tg} \alpha_0 / \cos m_0, \quad (4)$$

после чего можно определить осевые углы α_{xR0} и α_{xL0} профилей обеих (правой и левой) затылованных поверхностей зубьев фрезы при винтовой форме передней поверхности зубьев (стружечных канавок). Разработчики стандарта пользовались классическими формулами расчета этих углов:

для правозаходных фрез

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \alpha_{xR0} &= \operatorname{ctg} \alpha_{0x} - K_{z0} / P_z; \\ \operatorname{ctg} \alpha_{xL0} &= \operatorname{ctg} \alpha_{0x} + K_{z0} / P_z; \end{aligned} \quad (5)$$

для левозаходных фрез знак перед вторым слагаемым меняется на противоположный.

Однако для крупномодульных прецизионных фрез (типа 1) класса точности ААА, а также класса точности АА (типа 2) точности этих формул недостаточно, поскольку погрешность расчета и исполнения этих углов в $1'$ вносит погрешность профиля, соизмеримую с заданной стандартом допустимой погрешностью профиля зуба фрезы. Так, для модуля 10 мм угловая погрешность профиля в $1'$ соответствует линейной погрешности профиля более 6 мкм, что даже превышает полную величину допуска на этот параметр. В этой связи следует воспользоваться более точными формулами расчета этих углов из [10]:

$$\begin{aligned}\alpha_{xR0} &= \alpha_{0x} + k \sin^2 \alpha_{0x} / [P + p + k \operatorname{tg} \alpha_{0x}]; \\ \alpha_{xL0} &= \alpha_{0x} - k \sin^2 \alpha_{0x} / [P + p - k \operatorname{tg} \alpha_{0x}],\end{aligned}\quad (6)$$

где $P = P_z / 2\pi$ – винтовой параметр передней поверхности; $p = 0,5m_0 / \cos \gamma_{m0}$ – винтовой параметр производящей поверхности однозаходной фрезы; $k = Kz_0 / 2\pi$ – параметр затылования.

Таким образом, для правозаходной червячной фрезы осевой угол α_{xR0} профиля правой стороны зубьев больше осевого угла α_{0x} профиля производящей поверхности фрезы; угол α_{xL0} профиля левой стороны зубьев меньше угла α_{0x} . Для левозаходных фрез – обратный порядок: $\alpha_{xL0} > \alpha_{0x} > \alpha_{xR0}$. Численные значения этих углов приведены в табл. 2 Приложения 1 к стандарту, однако для фрез классов точности ААА, АА, а также А рекомендуется использовать для расчета этих углов формулы (6).

Углы $\gamma_{R,L}$ подъема обеих боковых затылованных поверхностей зубьев на делительном цилиндре правозаходной фрезы определяются по формуле

$$\begin{aligned}\operatorname{tg} \gamma_R &= (p + k \operatorname{tg} \alpha_{xR0}) / r_{m0}; \\ \operatorname{tg} \gamma_L &= (p - k \operatorname{tg} \alpha_{xL0}) / r_{m0},\end{aligned}\quad (7)$$

где $r_{m0} = d_{m0} / 2$ – радиус делительного цилиндра фрезы.

Для левозаходных фрез индексы R, L в формуле (7) меняются местами.

Затылование эвольвентных боковых поверхностей зубьев

Радиусы r_b основных цилиндров для правой (R) и левой (L) боковых сторон зубьев определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned}r_{bR} &= (p + k \operatorname{tg} \alpha_{xR0}) / (\operatorname{tg}^2 \alpha_{xR0} + \operatorname{tg}^2 \gamma_R)^{0,5}; \\ r_{bL} &= (p - k \operatorname{tg} \alpha_{xL0}) / (\operatorname{tg}^2 \alpha_{xL0} + \operatorname{tg}^2 \gamma_L)^{0,5}.\end{aligned}\quad (8)$$

Соответственно, углы α_b профиля затылуемых боковых поверхностей зубьев на основных цилиндрах, они же углы γ_b подъема этих поверхностей на основных цилиндрах, и они же углы α_W осевого профиля шлифовального круга для обработки каждой из боковых сторон зубьев фрезы определяются из следующих выражений:

$$\begin{aligned}\operatorname{tg} \alpha_{bR} &= \operatorname{tg} \gamma_{bR} = \operatorname{tg} \alpha_{WR} = (\operatorname{tg}^2 \alpha_{xR0} + \operatorname{tg}^2 \gamma_R)^{0,5}; \\ \operatorname{tg} \alpha_{bL} &= \operatorname{tg} \gamma_{bL} = \operatorname{tg} \alpha_{WL} = (\operatorname{tg}^2 \alpha_{xL0} + \operatorname{tg}^2 \gamma_L)^{0,5}.\end{aligned}\quad (9)$$

Зная эти параметры процесса затылования и шлифуемого изделия, можно определить органические погрешности – отклонения f_0 от прямолинейности осевых профилей эвольвентных затылуемых поверхностей зубьев и отклонения f_n – стрелки выпуклости – режущих кромок зубьев фрезы.

Кривизна $K_{(rm0)}$ осевого профиля затылованной поверхности в расчетной точке на делительном цилиндре определяется выражением

$$\begin{aligned}K_{R(rm0)} &= \operatorname{tg}^2 \gamma_R \cos^3 \alpha_{xR0} / (r_{m0} \operatorname{tg} \alpha_{xR0}); \\ K_{L(rm0)} &= \operatorname{tg}^2 \gamma_L \cos^3 \alpha_{xL0} / (r_{m0} \operatorname{tg} \alpha_{xL0}).\end{aligned}\quad (10)$$

Стрелка выпуклости f_0 осевого профиля каждой затылованной поверхности определяется с достаточной для практических расчетов точностью и в обозначениях настоящей работы имеет вид

$$\begin{aligned}f_{0R} &= m_0^2 K_{R(rm0)} / (2 \cos^2 \alpha_{xR0}); \\ f_{0L} &= m_0^2 K_{L(rm0)} / (2 \cos^2 \alpha_{xL0}).\end{aligned}\quad (11)$$

Соответственно, отклонение f_n от прямолинейности (выпуклость) режущих кромок на каждой из боковых сторон зубьев составит величину

$$\begin{aligned}f_{nR} &= f_{0R} \cos \gamma_R / \cos(\gamma_R - \gamma_{m0}); \\ f_{nL} &= f_{0L} \cos \gamma_L / \cos(\gamma_{m0} - \gamma_L).\end{aligned}\quad (12)$$

Сравнивая полученные расчетные значения отклонений f_n с допустимыми отклонениями f_{j0} профиля по параметру 9 «профиль зуба» (ГОСТ 9324–80, таблица 5), а также с допусками f_f на профиль зуба по ГОСТ 1643–81 «Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски», можно судить о возможности применения эвольвентных затылованных поверхностей в качестве боковых поверхностей зубьев чистовых червячных фрез для той или иной степени точности изготовления фрез.

В таблице приведены результаты расчетов органической погрешности затылования эвольвентных затылованных поверхностей зубьев фрез типа 1 для класса точности AAA по ГОСТ 9324–80 по параметру «допуск на профиль зуба» и в сравнении с требованиями ГОСТ 1643–81 для 5-й и 6-й

степеней точности. Численное исследование для фрез типа 1 показало, что основными параметрами, влияющими на величину органической погрешности профиля режущей кромки зуба, являются величина K спада затылка зуба на угловом шаге фрезы (Приложение 2) и модуль m_0 .

Сравнение погрешностей затылования с допусками на профили зубьев фрезы и нарезаемых зубчатых колес

Comparison of relieving errors with tolerances on the profiles of the hob teeth and cut gears

Модуль	Наружный диаметр фрезы	Допуск на профиль по ГОСТ 9324–80	Погрешности профилей производящей рейки зубьев с эвольвентными затылованными поверхностями		Допуск f_f на отклонение профиля зуба колеса по ГОСТ1643–81, мкм												
					5-я степень точности						6-я степень точности						
m_0	d_{a0}	f_{f0}	f_{nR}	f_{nL}	Делительный диаметр нарезаемого колеса, мм						Делительный диаметр нарезаемого колеса, мм						
мм	мм	мкм	мкм	мкм	до 125	св. 125 до 400	св. 400 до 800	св. 800 до 1600	св. 1600 до 2500	св. 2500 до 4000	до 125	св. 125 до 400	св. 400 до 800	св. 800 до 1600	св. 1600 до 2500	св. 2500 до 4000	св. 4000 до 6300
2	90	3	1,2	0,3	6	7	9	11	16	–	8	9	12	17	24	–	–
2,5	100	4	2,0	0,5	6	7	9	11	16	–	8	9	12	17	24	–	–
3,0	112	4	2,5	0,5	6	7	9	11	16	–	8	9	12	17	24	–	–
3,5	112	4	4,0	0,6	6	7	9	11	16	–	8	9	12	17	24	–	–
4	125	5	5,0	1	7	8	10	13	17	22	10	11	14	18	25	34	–
5	140	5	8	1	7	8	10	13	17	22	10	11	14	18	25	34	–
6	160	5	10	1,1	7	8	10	13	17	22	10	11	14	18	25	34	–
8	180	6	20	1,5	8	9	11	14	18	24	12	13	16	20	28	36	53
10	180	6	41	1,1	8	9	11	14	18	24	12	13	16	20	28	36	53

В результате исследования выявлено следующее.

1. Для фрез с модулями до 3,5 мм точность профилей обеих боковых поверхностей зубьев, затылованных как эвольвентные, с параметром K , соответствующим рекомендациям Приложения 2, технологически обеспечивается по классу фрез AAA. Для модуля 4 мм параметр K следует уменьшить с 6 до 5,5 мм, чтобы вписаться в допуск на профиль зуба 5 мкм. При этом в наиболее опасной для резания точке стыка прямолинейного профиля с радиусным участком на головке зуба задний угол зуба уменьшится незначительно – на $0,1^\circ$.

2. По левой стороне зубьев правозаходных фрез (по правой стороне для левозаходных) точность профиля боковой эвольвентной поверхности технологически обеспечивается на всем диапазоне модулей с многократным запасом.

3. Для фрез с эвольвентными затылованными поверхностями с модулем 5 и более органическая погрешность затылования по правой стороне зубьев (для правозаходных фрез) превышает допуск на профиль зубьев, указанный в ГОСТ 9324–80. Однако фрезы с модулями 5 и 6 мм допускается применять для нарезания

колес 5-й и 6-й степеней точности в том случае, если погрешность профиля зубьев фрезы не превышает допуск на погрешность профиля зубьев колеса в соответствии с ГОСТ 1643–81, зависящий от делительного диаметра (числа зубьев) нарезаемого колеса. Так, фрезы модуля 5 можно использовать для нарезания колес 5-й степени с числом зубьев более 80 и для колес 6-й степени независимо от числа зубьев. Для фрез модуля 6 мм органическая погрешность затылования правой эвольвентной поверхности зубьев равна допустимой погрешности профиля зубьев нарезаемого колеса для степени точности 5 с числом зубьев 67...133, а для колес с большим количеством зубьев имеет место запас точности по профилю не менее 30 %. Для колес 6-й степени точность профиля зубьев колеса обеспечивается для числа зубьев 21 и более.

4. При затыловании фрез с модулями 8...10 на левой стороне зубьев эвольвентные затылованные поверхности обеспечивают точность профиля с многократным запасом, а при затыловании правых боковых поверхностей зубьев шлифовальный круг необходимо профилировать по кривой, компенсирующей органическую погрешность, возникающую при обработке коническим кругом.

Общий угол φ_a поворота фрезы за рабочий ход затылования должен составить, таким образом,

$$\varphi_a = (b_0 + b_a) / r_{a0}, \quad (18)$$

а спад K_a затылка на рабочем участке затылования и собственно рабочий ход затылования составит

$$K_a = k\varphi_a. \quad (19)$$

Таким образом, общая длина дуги шлифования зуба и рабочего хода зависит от радиуса r_b основного цилиндра – чем больше r_b , тем больше должны быть длина дуги шлифования и рабочий ход затылования, чтобы обеспечить требуемую длину шлифованной части зуба для перезаточек фрезы. Применительно к правозаходным фрезам: при затыловании левой стороны зубьев (правой стороны впадины между витками производящей поверхности) требуемый ход затылования меньше, чем при затыловании правой стороны.

Предварительное затылование зубьев

Предварительное затылование зубьев резцом производится перед термическим упрочнением (закалкой) фрезы, при этом выполняются две основные задачи. Во-первых, сформировать припуск под шлифование; во-вторых, образовать пространство для выхода шлифовального круга после обработки. Предварительно затылованная поверхность формируется как архимедова винтовая поверхность, так как режущую кромку резца устанавливают в осевой плоскости фрезы с углом осевого профиля α_{xR0} и α_{xL0} для правой и левой боковых сторон зубьев соответственно. Припуск под шлифование зубьев оставляют по наружному диаметру и по боковым поверхностям. Для образования пространства под выход шлифовального круга припуску придают клинообразную форму (рис. 2).

Клинообразный припуск образуют путем предварительного затылования резцом с увеличенной величиной K_1 спада затылка на угловом шаге зубьев.

Задаваясь необходимой величиной припуска a_t на наружном цилиндре фрезы, из элементарных геометрических представлений получим:

для фрез модулем до 4 мм включительно

$$K_{1(\leq 4)} = K + 4at; \quad (20)$$

для фрез модулем > 4 мм

$$K_{1(> 4)} = K + 6at. \quad (20a)$$

Величину припуска a_t на наружном цилиндре назначают с учетом образующегося на боковых

поверхностях зубьев припуска $a_t \sin \alpha_0$. Как правило, достаточной величиной a_t является $0,25 \dots 0,3$ мм. При этом припуск на боковых сторонах зубьев составляет $0,085 \dots 0,1$ мм (меньшее значение для $m_0 \leq 4$ мм).

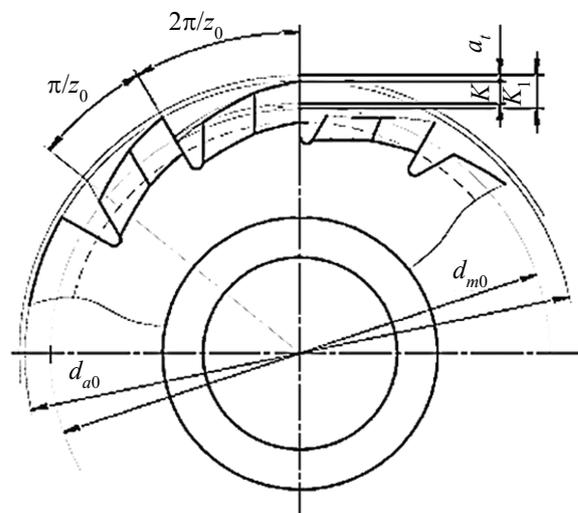


Рис. 2. Определение спада K_1 архимедовой спирали при предварительном затыловании резцом: K – спад архимедовой спирали затыловочного кулачка на одном угловом шаге фрезы $2\pi/z_0$; K_1 – спад архимедовой спирали затыловочного кулачка при предварительном затыловании резцом; a_t – припуск по вершине зуба на шлифование на наружном цилиндре фрезы; d_{a0} – диаметр наружного цилиндра фрезы; d_{m0} – диаметр делительного цилиндра фрезы

Fig. 2. Determination of the decline K_1 of the Archimedean spiral during preliminary relieving with a cutter: K - is the fall of the Archimedean spiral of the relief cam on one angular step of the cutter $2\pi/z_0$; K_1 - decay of the Archimedean spiral of the relief cam during preliminary relief with a cutter; a_t - allowance for the tooth tip for grinding on the outer cylinder of the cutter; d_{a0} - is the diameter of the outer cylinder of the cutter; d_{m0} - diameter of the cutter indexing cylinder

В тех случаях, когда изношенность станка для предварительного затылования не обеспечивает требуемую технологическую точность операции, значения припусков назначают больше указанных выше. При этом следует увеличивать и величину K_1 , чтобы обеспечить достаточное пространство для выхода шлифовального круга.

Исключение недопрофилирования затылованных поверхностей

При шлифовании эвольвентных затылованных поверхностей линия контакта шлифующей и шлифуемой поверхностей проходит по касательной к основному цилиндру радиуса r_b , пересекая ось шлифовального круга (см. рис. 1). И чтобы полностью спрофилировать рабочий участок профиля шлифуемой поверхности, ис-

ключив его недопрофилирование на ножке зуба, на межосевом перпендикуляре круга и изделия требуется дополнительно заглубить круг во впадину между витками на величину Δh_w , соответственно, занизив дно впадины. При шлифовании витков эвольвентных червяков Δh_w определяется по формуле

$$\Delta h_w = r_f - (r_f^2 - r_b^2)^{0,5}, \quad (21)$$

где r_f – минимальный радиус активного профиля шлифуемой поверхности.

С учетом спада затылка на угловом шаге зубьев фрезы минимальный шлифуемый радиус r_{fK} затылуемой боковой поверхности зубьев является переменным и определяется как

$$r_{fK} = r_{a0} - 2,5m_0 - K_a, \quad (22)$$

и определять величину Δh_w следует по формуле (21) с учетом наибольшего из значений $r_f = r_{fK}$ из формулы (22), т. е. у правозаходных фрез при значении K_a для правой стороны зубьев K_{aR} из формул (15)–(19). Величина радиуса r_b определена для каждой из сторон зуба формулами (8). Указанное занижение впадины рекомендуется точить кольцевой канавкой на всю ширину между витками зубьев.

Исключение подрезания шлифуемых поверхностей зубьев фрезы

В процессе обработки рабочий ход затылования каждого зуба заканчивается скачковым реверсом затыловочного суппорта (отскоком), после которого начинается новый рабочий ход. Подрезание шлифуемых поверхностей зубьев при затыловании происходит в случае врезания наружного диаметра шлифовального круга или его затылующей поверхности в режущую кромку следующего зуба. На практике условие отсутствия подрезания выполняется путем подбора соответствующего диаметра (радиуса) шлифовального круга.

Заключение

1. Исследован процесс затылования боковых поверхностей зубьев чистовых зуборезных фрез как аналогов эвольвентных винтовых поверхностей. Профиль шлифовального круга прямолинейный, а оси шлифовального круга и шлифуемого изделия – червячной фрезы – параллельны.

2. Разработана методика расчета параметров фрезы: основных цилиндров эвольвентных боковых поверхностей зубьев, профильных углов в осевом сечении и в плоскости касательной к основному цилиндру; определены параметры

кривизны и органической погрешности профиля получаемой затылованной поверхности в осевом сечении зубьев и в плоскости производящей рейки фрезы.

3. Применительно к фрезам типа 1 (класс точности ААА) получаемые погрешности профиля зуба фрезы сопоставлены с параметрами точности по ГОСТ 9324–80 и ГОСТ 1643–81 для 5-й и 6-й степеней точности. Показано, что для той стороны зубьев этих фрез, где угол подъема производящей поверхности больше угла подъема затылованной поверхности, точность профиля производящей рейки обеспечивается с многократным запасом для всех типоразмеров фрез. Для стороны зубьев, где угол подъема затылованной поверхности зубьев больше угла подъема производящей поверхности фрезы (правая сторона зуба правозаходной фрезы) у фрез с модулями до 3,5 мм точность профиля боковых поверхностей зубьев технологически обеспечивается по классу точности фрез ААА. Для фрез с модулями 4...6 мм даны рекомендации по их применению для нарезания колес 5-й и 6-й степеней точности. Зубья фрез с модулями 8...10 мм следует затыловать шлифовальным кругом с профилем, исключая органическую погрешность.

5. Приведен порядок расчета рабочего хода затылования при обработке эвольвентных затылованных поверхностей и определена конструктивная доработка дна впадины между витками производящей поверхности для исключения недопрофилирования шлифуемых поверхностей зубьев.

6. Определен спад затылка для предварительного затылования зубьев резцом перед термообработкой для обеспечения требуемого припуска под шлифование и свободного выхода шлифовального круга после рабочего хода.

Библиографические ссылки

1. Лагутин С. А., Сандлер А. И. Построение функционально ориентированной технологии второго порядка при обработке зубчатых колес // Научные технологии в машиностроении. 2017. № 2 (68). С. 31–35.
2. Sandler A.I., Lagutin S.A. and Gudov E.A. Actual Issues of Design and Production of Advanced Worm Gears. *Advanced Gear Engineering*, Springer Intern. Publishing AG Switzerland, 2018, pp. 139-166.
3. Sandler A.I. and Lagutin S.A. Relieving the teeth of hobs for cutting the Wildhaber-Novikov gears. The 10th International Conference KOD 2018 “Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering”, Novi Sad, Serbia / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 393, doi:10.1088/1757-899X/393/1/012068.

4. Некоторые результаты проектирования и освоения серийного производства ответственной червячной передачи / Е. С. Трубачев, Т. В. Савельева, Т. А. Пушкарева, Л. Н. Фарукшина // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2017. № 2 (20). С. 76–81. DOI: 10.22213/2413-1172-2017-2-76-81.

5. Volkov A., Medvedev V. Tool Profiling for the Grinding of Helical Surfaces. *Advanced Gear Engineering, Mechanisms and Machine Science* 51, Springer International Publishing AG Switzerland, 2018, pp. 305-325.

6. Huai C. and Zhao Y. Influence of grinding wheel parameters on the meshing performance of toroidal surface enveloping conical worm drive. *Mechanical Sciences*, 2019, vol. 10, pp. 199-211.

7. Андросов С. П. Уравнение режущих кромок червячной модульной фрезы // Приволжский научный вестник. 2013. № 2 (18). С. 4–7.

8. Панкратов Ю. М. Математическое моделирование в технологии профилирования дисковых заточивочных инструментов // Металлообработка. 2015. № 4 (88). С. 48–55.

9. Парфенов В. Э., Хандожко А. В., Киричек А. В. Конструкция черновой червячной фрезы для обработки зубчатого колеса крупного модуля // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 7 (80). С. 23–29. DOI: 10.30987/article_5d2d92319a8d00.64590625.

10. Сандлер А. И., Лагутин С. А., Гудов Е. А. Теория и практика производства червячных передач общего вида / под общ. ред. С. А. Лагутина. М.: Инфра-Инженерия, 2016. 346 с.

References

1. Lagutin S.A., Sandler A.I. [Construction of a functionally oriented second-order technology in processing gear wheels]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2017, no. 2, pp. 31-35 (in Russ.).

2. Sandler A.I., Lagutin S.A. and Gudov E.A. Actual Issues of Design and Production of Advanced Worm Gears. *Advanced Gear Engineering*, Springer Intern. Publ. AG Switzerland, 2018, pp. 139-166.

3. Sandler A.I. and Lagutin S.A. Relieving the teeth of hobs for cutting the Wildhaber-Novikov gears. The 10th International Conference KOD 2018 “Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering”, Novi Sad, Serbia / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 393, doi:10.1088/1757-899X/393/1/012068.

4. Trubachev E.S., Savel'eva T.V., Pushkareva T.A., Farukshina L.N. [Some results of the design and development of serial production of a responsible worm gear]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2017, no. 2, pp. 76-81. DOI: 10.22213/2413-1172-2017-2-76-81.

5. Volkov A., Medvedev V. Tool Profiling for the Grinding of Helical Surfaces. *Advanced Gear Engineering, Mechanisms and Machine Science* 51, Springer International Publishing AG Switzerland, 2018, pp. 305-325.

6. Huai C. and Zhao Y. Influence of grinding wheel parameters on the meshing performance of toroidal surface enveloping conical worm drive. *Mechanical Sciences*, 2019, vol. 10, pp. 199-211.

7. Androsov S.P. [Equation of cutting edges of a worm modular cutter]. *Privolzhskii nauchnyi vestnik*, 2013, no. 2, pp. 4-7 (in Russ.).

8. Pankratov Yu.M. [Mathematical modeling in the technology of profiling disk backing tools]. *Metallorabotka*, 2015, no. 4, pp. 48-55 (in Russ.).

9. Parfenov V.E., Khandozhko A.V., Kirichek A.V. [The design of a black worm cutter for processing a gear wheel of a large module]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, no. 7, pp. 23-29. DOI: 10.30987/article_5d2d92319a8d00.64590625 (in Russ.).

10. Sandler A.I., Lagutin S.A., Gudov E.A. [Theory and practice of general worm gear production. Moscow, Infra-Engineering Publ., 2016. 346 p. (in Russ.).

Technique of Tooth Relieving for Gear Cutting Hobs

A.I. Sandler, PhD in Engineering, “SELLACTION” LLC, Moscow, Russia

The relieved flank of the hob is an analog of a helical surface with a lead angle increased for one tooth flank and reduced for the other relative to the hob generating surface's lead angle, i.e., a helical surface on which the cutting edges of the hob teeth are located. The main disadvantages of the existing relieving technique are the distortion of the generating surface profile during hob regrinding to restore the cutting properties of the tool, the dependence of the relieving setting-up on the diameter of the grinding wheel, and the high complexity of achieving the required accuracy of the hob profile.

It is proposed to produce hob tooth flanks as involute surfaces. A theoretically accurate involute helical surface may be obtained with grinding on the grinding wheel's parallel axes with a straight profile and the product. The formation of involute flanks of the hob teeth is considered. The procedure for calculating the parameters of the hob and the relieving process is given. The method for determining the organic error of the obtained profile of the hob generating rack is developed. The main parameter of the preliminary grinding of the hob is determined - the tooth flank's recession at the hob angular step, depending on the length of the ground part of the tooth and the grinding allowance. The hob and the relieving process parameters are studied, which exclude incompletely relieved surfaces. Calculation examples as applied to the manufacture of precision hobs of the accuracy grade AAA are given.

Keywords: hob, grinding, radial relieving, relieved tooth flank, involute gearwheels.

Получено 26.05.2020

Образец цитирования

Сандлер А. И. Технология затылования зуборезных червячных фрез // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 4. С. 29–38. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-29-38.

For Citation

Sandler A.I. [Technique of Tooth Relieving for Gear Cutting Hobs]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 29-38 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-29-38.