

# Геометрия контакта и технологические аспекты затылования зубьев зуборезных червячных фрез

## Часть 1. Определение параметров фрез и линий контакта при затыловании

А. И. Сандлер

Определены основные параметры боковых поверхностей зубьев зуборезных червячных фрез и геометрия контактных линий при операции их радиального затылования.

**Ключевые слова:**

радиальное затылование, боковые поверхности зубьев червячных фрез, шлифовально-затыловочный станок, профилирование шлифовального круга, эвольвентная винтовая поверхность, радиусы кривизны, кривизна, линии контакта

УДК 621.9 | ВАК 2.5.5

DOI: 10.22184/2499-9407.2024.34.1.64.70

### Введение

Основой производящего червяка фрезы при нарезании цилиндрических колес эвольвентного зацепления является производящая рейка – совокупность режущих кромок зубьев в одной стружечной канавке фрезы. При нарезании зубьев цилиндрических зубчатых колес производящий червяк зуборезного инструмента на зубофрезерном станке образует расположением оси винтовой поверхности режущих кромок зубьев таким образом, чтобы производящая рейка в зоне обработки была параллельна нормальному сечению (или перпендикулярна направлению) нарезаемых зубьев колеса. Винтовая поверхность фрезы, на которой расположены режущие кромки зубьев, является производящей поверхностью фрезы. Затылованные поверхности боковых сторон зубьев червячной фрезы, образующие в процессе резания задние углы, – это аналоги винтовых поверхностей с углами подъема, один из которых увеличен для одной стороны зуба относительно угла подъема витка производящей поверхности фрезы и уменьшен для другой стороны зуба.

Номенклатура фрез и отклонения от прямолинейности профиля режущих кромок зубьев фрезы определены действующим стандартом ГОСТ 9324-2015 «Фрезы червячные цельные чистовые для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем. Технические условия».

В технологическом процессе изготовления червячных фрез затылование боковых поверхностей зубьев шлифовальным кругом остается до настоящего времени самой трудоемкой операцией. Поскольку геометрия образования линий контакта шлифовального круга и затылуемых поверхностей до настоящего времени не была функционально определена, в практике производства червячных фрез утвердился метод обработки каждой из боковых сторон зубьев с углом установки оси шлифовального круга, равным углу подъема производящей поверхности фрезы на делительном цилиндре. Для получения требуемой точности профиля режущих кромок зубьев осуществляют длительную наладку шлифовально-затыловочного станка по параметрам профилирования шлифовального круга, производят пробные проходы шлифования и промежуточные

операции контроля. Таким образом, проблемы затылования боковых поверхностей зубьев прецизионных червячных фрез для цилиндрических зубчатых колес остаются актуальными до настоящего времени.

Работы автора [1, 2] по затылованию зубьев зуборезных червячных фрез, в том числе в соответствии с указанным стандартом, касались определения принципиальной возможности достижения требуемой точности профиля для каждой из боковых сторон зубьев фрезы при параллельных осях дискового шлифовального круга и фрезы, то есть как теоретически эвольвентных. Однако, стандартом ГОСТ 9324-2015 предусмотрено изготовление и многозаходных червячных фрез. При обработке боковых поверхностей зубьев таких фрез параллельное расположение осей шлифовального круга и червячной фрезы практически невозможно. Поэтому разработка методов расчета параметров процесса затылования для обеспечения требуемой точности профиля режущих кромок зубьев фрез с числом заходов 2 и более, а также сокращение технологического времени на наладку и переналадку станка остаются на настоящее время актуальными задачами [5–9].

### Цель работы

Целью данной работы является, в первую очередь, уточнение геометрии образования контактных линий поверхностей шлифовального круга и затылуемых боковых поверхностей зубьев червячной фрезы. На основании этого исследования во 2 и 3 частях данной статьи для операции радиального затылования (наиболее распространено в производстве червячных фрез) определим функциональные зависимости расчета основных параметров наладки шлифовально-затыловочного станка для достижения требуемой точности профиля зубьев производящей рейки: углов наклона оси шлифовального круга относительно горизонтальной плоскости и профилей рабочих поверхностей шлифовального круга для обработки каждой из сторон зубьев.

### Основные параметры боковых поверхностей зубьев фрезы

Параметры шлифуемой поверхности определяют из исходных данных:  $m_0$  – модуль производящей рейки (зубьев нарезаемого колеса), угла  $\alpha_0 = 20^\circ$  профиля производящей рейки, угла  $\gamma_{m0}$  подъема на ее делительном цилиндре и осевого угла  $\alpha_{0x}$  профиля производящей поверхности червячной фрезы:

$$\operatorname{tg} \alpha_{0x} = \operatorname{tg} \alpha_0 / \cos \gamma_{m0}. \quad (1)$$

Величину угла  $\gamma_{m0}$  определяем из известной зависимости:

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

где  $d_{m0}$  – диаметр делительного цилиндра. Для новой фрезы его можно определять исходя из заданной стандартом величины ее наружного диаметра  $d_{a0}$ :  $d_{m0} = d_{a0} - 2,5 m_0$ .

Чтобы получить требуемый осевой угол профиля  $\alpha_{0x}$  производящей поверхности фрезы с винтовыми стружечными канавками (передними поверхностями зубьев), затылуемая поверхность зубьев должна иметь угол  $\alpha_x$  профиля, определенный с учетом хода  $P_z$  стружечной канавки, числа заходов  $Z$  производящей поверхности, спада  $K$  затылуемой поверхности на одном угловом шаге зубьев фрезы. Применительно к правозаходным фрезам, величины углов  $\alpha_x$  для правой ( $R$ ) и левой ( $L$ ) боковых сторон зубьев определяем по формулам [1–4]:

$$\begin{aligned} \alpha_{xR} &= \alpha_{0x} + 57,296 k \sin^2 \alpha_{0x} / [P + p + k \operatorname{tg} \alpha_{0x}] \text{ и} \\ \alpha_{xL} &= \alpha_{0x} - 57,296 k \sin^2 \alpha_{0x} / [P + p - k \operatorname{tg} \alpha_{0x}], \end{aligned} \quad (3)$$

где:  $P = P_z / 2\pi$  – винтовой параметр передней поверхности,  $P_z$  – ход стружечной канавки (винтовой передней поверхности);

$p = 0,5 m_0 Z / \cos \gamma_{m0}$  – винтовой параметр производящей поверхности фрезы;

$k = K z_0 / 2\pi$  – параметр затылования,  $K$  – спад затылка зуба, заданный в направлении движения затылования (для радиального затылования – перпендикулярно оси фрезы);

$z_0$  – число стружечных канавок фрезы (или зубьев в ее поперечном сечении);

57,296 – коэффициент перехода от радианной к градусной величине угловой поправки.

Таким образом, для правозаходной червячной фрезы осевой угол  $\alpha_{xR}$  профиля правой стороны зубьев больше осевого угла  $\alpha_{0x}$  профиля производящей поверхности фрезы, угол  $\alpha_{xL}$  профиля левой стороны зубьев меньше угла  $\alpha_{0x}$ . Для левозаходных фрез – обратный порядок:

$$\alpha_{xL} > \alpha_{0x} > \alpha_{xR}.$$

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

$$\operatorname{tg} \gamma_R = (p + k \operatorname{tg} \alpha_{xR}) / r_{m0}; \quad \operatorname{tg} \gamma_L = (p - k \operatorname{tg} \alpha_{xL}) / r_{m0}, \quad (4)$$

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

На произвольном радиусе  $r_i$  боковых поверхностей углы  $\gamma_i$  подъема в каждой точке профиля определяем из выражений:

$$\operatorname{tg} \gamma_{Ri} = (p + k \operatorname{tg} \alpha_{xR}) / r_i; \quad \operatorname{tg} \gamma_{Li} = (p - k \operatorname{tg} \alpha_{xL}) / r_i. \quad (5)$$

Для левозаходных фрез индексы  $R, L$  в формулах (4) и (5) меняются местами.

**Таблица 1.** Величины спада  $K$  затылка зуба на угловом шаге фрезы (округление до 0,5 мм)

$m_0$ , мм	$d_{a0}$ , мм	$z_0$	$K$ , мм	$m_0$ , мм	$d_{a0}$ , мм	$z_0$	$K$ , мм
<b>Исполнение 1</b>				<b>Исполнение 2 (продолжение)</b>			
0,5–1,0	24	12	1,3 (1,5)	6,0	105	12	5,5
0,5–1,125	32	12	1,7 (2)	6,5	110	12	5,7 (5,5)
1,25–2,0	40	10	2,5	7,0	115	12	6,0
<b>Исполнение 2</b>				8,0	120	10	7,5
1,0–1,375	50	14	2,3 (2,5)	9,0	125	10	7,8 (8,0)
1,5–1,75	55	14	2,5	10	130	10	8
2,0–2,25	65	14	3,0	11	150	10	9,5
2,5–2,75	70	14	3,1 (3,0)	12	160	9	11
3,0	75	14	3,4 (3,5)	14	180	9	12,5
3,5	80	14	3,6 (3,5)	16	200	9	14,0
4,0	85	14	3,8 (4,0)	18	220	9	15,0
4,5	90	14	4,0	20	240	9	16,5
5,0	95	14	4,2 (4,5)	22	250	9	17
5,5	100	12	5,2 (5,0)	25	280	9	19

**Таблица 2.** Максимальные числа  $Z_{max}$  заходов червячных фрез по стандарту ГОСТ 9324-2015 и числа  $Z_L$  заходов фрез, у которых боковая сторона с меньшим углом подъема противоположна по направлению производящей поверхности

$m_0$ , мм	$d_{a0}$ , мм	$Z_{max}$	$Z_L$	$m_0$ , мм	$d_{a0}$ , мм	$Z_{max}$	$Z_L$
<b>Исполнение 1</b>				<b>Исполнение 2 (продолжение)</b>			
0,5–1,0	24	7	3–1	6,0	105	4	1
0,5–1,125	32	7	4–2	6,5	110	2	1
1,25–2,0	40	7	2–1	7,0	115	2	1
<b>Исполнение 2</b>				8,0	120	2	1
1,0–1,375	50	7	3–2	9,0	125	2	1
1,5–1,75	55	7	2	10	130	2	1
2,0–2,25	65	7	2	11	150	2	1
2,5–2,75	70	7	1	12	160	2	–
3,0	75	7	1	14	180	2	–
3,5	80	7	1	16	200	2	–
4,0	85	4	1	18	220	1	–
4,5	90	4	1	20	240	1	–
5,0	95	4	1	22	250	1	–
5,5	100	4	1	25	280	1	–

Расчетные значения величин спада  $K$  затылка для фрез исполнений 1 и 2 определены в работе [2] и приведены здесь в табл. 1 с точностью установки величины  $K$  до 0,1 мм. На ряде моделей эксплуатируемых шлифовально-затыловочных станков цена деления шкалы установки  $K$  составляет до 0,5 мм. В связи с этим, в табл. 1, дополнительно к расчетным, в скобках показаны рекомендуемые значения спада  $K$  затылованной поверхности с округлением величин до 0,5 мм.

Как показано выше, углы подъема шлифуемых правой и левой боковых поверхностей зубьев разные (5). У правозаходных фрез левая боковая сторона зубьев имеет уменьшенный винтовой параметр  $(p - k \operatorname{tg} \alpha_{xL}) < p$ , следовательно, уменьшенные углы подъема затылованной поверхности относительно производящей поверхности. Если  $p < k \operatorname{tg} \alpha_{xL}$ , что характерно для ряда типоразмеров червячных фрез малых и средних модулей, то одна из боковых затылуемых поверхностей зубьев имеет правое направление витка, а вторая – левое. Случаи левого направления при правозаходной производящей поверхности фрезы имеют место для левой боковой стороны зубьев однозаходных червячных фрез модулем  $m_0 \leq 11$  мм. С учетом методики расчета величины  $k$  из условия обеспечения бокового заднего угла не менее  $4^\circ$  [2], соотношение параметров  $p < k \operatorname{tg} \alpha_{xL}$  приводим к виду:

$$Z_L < 0,07 d_a / m_0, \quad (6)$$

где  $Z_L$  – число заходов фрезы, где боковая сторона с меньшим углом подъема противоположна по направлению производящей поверхности.

В табл. 2 приведены максимальные числа  $Z_{max}$  заходов червячных фрез по стандарту ГОСТ 9324-2015 с нормированной точностью профиля и числа  $Z_L$  заходов фрез с разными направлениями затылованных поверхностей зубьев, рассчитанные по формуле (6).

Из проведенного расчета видно, что для фрез малых модулей – от 0,5

до 2,25 мм – имеет место противоположное направление одной из затылуемых поверхностей направлению производящей поверхности при числе  $Z_L$  заходов, соответственно, от 4 до 2. Для модулей от 2,5 мм до 11 мм  $Z_L = 1$ .

### Линии контакта при шлифовании винтовых и затылованных поверхностей

Известна [1, 2, 10] возможность шлифования дисковым коническим кругом винтовых поверхностей витков червяка и затылования боковых поверхностей зубьев фрез как исходно эвольвентных при параллельных осях  $O_1-O_1$  изделия и  $O_w-O_w$  шлифовального круга с прямолинейным осевым профилем. Контактная линия круга и шлифуемой поверхности касается основного цилиндра эвольвентной винтовой поверхности и пересекает ось шлифовального круга. При этом в осевом сечении шлифуемой поверхности образуется выпуклый профиль проекции эвольвенты.

При шлифовании дисковым шлифовальным кругом винтовых и затылуемых поверхностей с **прямолинейным** осевым профилем, каждая из точек осевого профиля шлифуемой поверхности на радиусе  $r_i$  с заданным углом профиля  $\alpha_x$  и углом подъема  $\gamma_i$  может быть рассмотрена как элемент эвольвентной винтовой поверхности. Для каждой точки осевого профиля может быть определен свой основной цилиндр радиусом  $r_{bi}$ , угол  $\alpha_{bi}$  профиля шлифуемой поверхности в плоскости, касательной к основному цилиндру и равные ему угол  $\gamma_{bi}$  подъема образующей и угол  $\alpha_{wi}$  профиля шлифовального круга в этой же плоскости. Величины этих углов рассчитываем по известной [3, 4, 10] формуле, исходя из осевого угла  $\alpha_x$  профиля шлифуемой поверхности и угла  $\gamma_i$  подъема винтовой линии поверхности в расчетной точке профиля:

$$\operatorname{tg} \alpha_{bi} = \operatorname{tg} \gamma_{bi} = \operatorname{tg} \alpha_{wi} = (\operatorname{tg}^2 \alpha_x + \operatorname{tg}^2 \gamma_i)^{0.5}. \quad (7)$$

Радиус  $r_{bi}$  основного цилиндра для каждой точки осевого профиля определяем как:

$$r_{bRi} = (p + k \operatorname{tg} \alpha_{xR}) / \operatorname{tg} \alpha_{bRi} \text{ и} \\ r_{bLi} = (p - k \operatorname{tg} \alpha_{xL}) / \operatorname{tg} \alpha_{bLi}. \quad (8)$$

Задаемся постоянством осевого угла  $\alpha_x$  профиля шлифуемой винтовой или затылованной поверхности. На участке зубьев, примыкающем к головкам зубьев фрезы, угол подъема шлифуемой поверхности наименьший для профиля за счет большего диаметра, следовательно, угол  $\alpha_{ba} = \gamma_{ba} = \alpha_{wa}$  профиля и наклона образующей эвольвентной поверхности наименьший, поэтому здесь радиус  $r_{ba}$  основного цилиндра будет наибольшим для шлифуемого профиля. Для участка ножек зубьев угол  $\alpha_{bf} = \gamma_{bf} = \alpha_{wf}$  профиля и подъема образующей эвольвентной

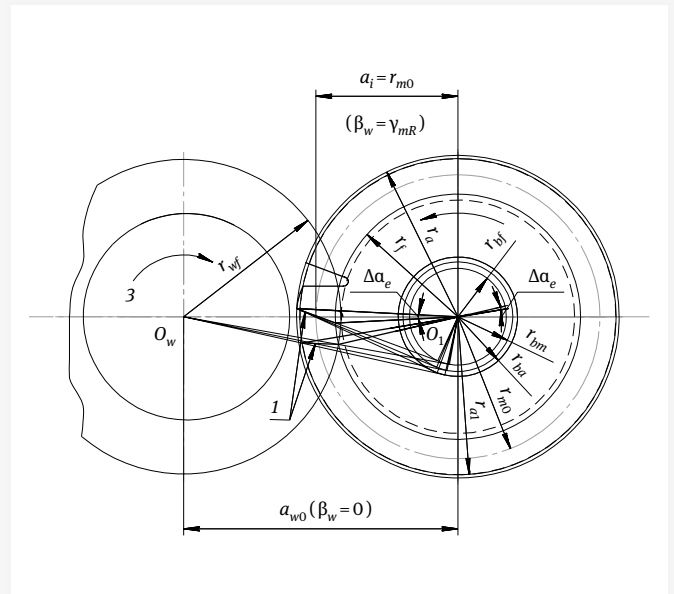


Рис. 1. Формирование линий контакта при шлифовании поверхности с прямолинейным профилем: 1 – линии контакта прямолинейного профиля, 2, 3 – направления вращения фрезы шлифовального круга

поверхности наибольший, соответственно, радиус  $r_{bf}$  основного цилиндра будет наименьшим.

Обратимся к рис. 1. При параллельных осях  $O_w-O_w$  круга и  $O_1-O_1$ , все касательные к основным цилиндрам точек профиля зуба сходятся на оси шлифовального круга.

Заданную точку осевого профиля шлифуемой поверхности на линии контакта поверхностей круга и изделия получаем в точке пересечения касательной к основному цилиндру и цилиндра, на котором расположена заданная точка осевого профиля. Все касательные к основным цилиндрам, соответствующие точкам осевого профиля шлифуемой поверхности, сходятся в одной точке межосевого перпендикуляра, и огибающая линия полученных таким образом точек контакта является геометрическим местом точек общих нормалей к этим поверхностям и определяет линию контакта поверхностей круга и изделия.

При изменении угла  $\beta_w$  наклона оси шлифовального круга относительно оси изделия касательные к основным цилиндрам шлифуемой поверхности также изменяют свое положение. Так, при величине  $\beta_w$ , равной углу подъема шлифуемой поверхности на делительном цилиндре, линия контакта круга и шлифуемой поверхности зуба пересекает межосевой перпендикуляр в точке на делительном цилиндре [3, 4], и, таким образом, все касательные к основным цилиндрам точек профиля шлифуемой поверхности пересекают межосевой перпендикуляр в той же точке.

Очевидно, что касательные к основным цилиндрам шлифуемой поверхности и линия контакта последней с поверхностью шлифовального круга могут занимать и другие положения относительно межосевого перпендикуляра, в зависимости от значения угла  $\beta_w$  установки оси шлифовального круга.

И точка межосевого перпендикуляра, где сходятся все касательные к основным цилиндрам, соответствующие точкам профиля, будет определена углом  $\beta_w$  наклона оси шлифовального круга относительно оси изделия. Если угол наклона оси круга равен углу подъема шлифуемой поверхности в пределах высоты шлифуемого профиля, то и пересечение линии контакта круга и шлифуемой поверхности с межосевым перпендикуляром имеет место в пределах высоты шлифуемого профиля в точке на радиусе  $r_i$ , где эти углы равны.

Например, для правой стороны зубьев правозаходной червячной фрезы:

$$\operatorname{tg} \beta_w = (p + k \operatorname{tg} \alpha_{xR}) / r_i \quad (9)$$

Если угол наклона оси шлифовального круга отличается от значений углов подъема шлифуемой поверхности, то касательные к основным цилиндрам точек шлифуемого профиля пересекаются с межосевым перпендикуляром вне профиля шлифуемой поверхности, на расстоянии  $a_i$  от оси фрезы. И при заданном значении угла  $\beta_w$ , его следует определять из выражения:

$$a_i = (p + k \operatorname{tg} \alpha_{xR}) / \operatorname{tg} \beta_w \quad (10)$$

Протяженность и конфигурация линии контакта внутри крайних точек шлифуемого профиля с изменением угла  $\beta_w$  практически не меняется, так как неизменен центральный угол  $\Delta \alpha_e$ , охватывающий линию контакта поверхности круга и шлифуемой поверхности. Изменяется ее наклон и расстояние относительно межосевого перпендикуляра (рис 1).

Для левой стороны зубьев правозаходной фрезы (на правой стороне впадины, если смотреть на переднюю поверхность зубьев) в формулах (9), (10) знак (+) следует заменить на знак (-) и индекс (R) на (L) в обозначении угла  $\alpha_x$ . Во всех точках профиля этой стороны зубьев, соответственно, меньшие радиусы основных цилиндров.

При  $p < k \operatorname{tg} \alpha_{xL}$  эта (левая) сторона зубьев имеет противоположное направление затылуемой поверхности относительно правой стороны, вследствие этого линии контакта поверхности круга и затылуемой поверхности для обеих сторон зуба находятся по одну сторону от межосевого перпендикуляра и различаются углами между собственно линией контакта и межосевым перпендикуляром.

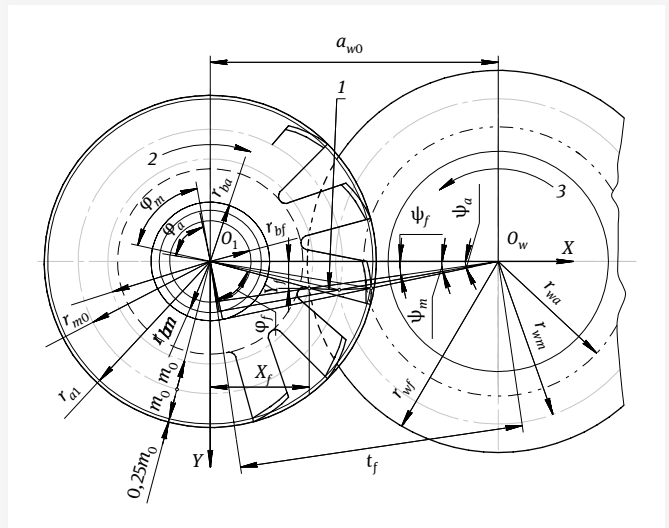


Рис. 2. Определение координат линий контакта: 1 – линия контакта, 2 – направление вращения фрезы, 3 – направление вращения шлифовального круга

### Определение координат линии контакта

Обратимся к рис. 2. **Исходное положение** линии контакта имеет место при параллельных осях круга и фрезы, то есть при  $\beta_w = 0$ .

Это положение примечательно совпадением и определенностью углов профиля шлифуемой поверхности и осевого профиля шлифовального круга для всех точек профиля шлифуемой поверхности вследствие равенства (7) и, следовательно, определенностью параметров кривизны профиля шлифовального круга, компенсирующей отклонение профиля исходной эвольвентной затылуемой поверхности от необходимой архимедовой.

Для нахождения координат X, Y точек линии контакта сначала необходимо определить длину  $a_{w0}$  межосевого перпендикуляра осей круга и фрезы. Наиболее удобно это делать с помощью касательной к основному цилиндру радиуса  $r_{bf}$  точки профиля шлифуемой поверхности на цилиндре впадин радиуса  $r_f$ , так как в этой точке имеет место контакт с шлифовальным кругом на его максимальном радиусе  $r_{wf}$  рабочей поверхности. От оси фрезы проводим перпендикуляр к касательной основного цилиндра радиуса  $r_{bf}$ . Касательная проходит через точку профиля впадины на радиусе  $r_f$ . Длину касательной  $t_f$  определяем в виде:

$$t_f = r_{wf} + r_{bf} \operatorname{tg} \varphi_f \quad (11)$$

где  $\varphi_f$  – угол между радиусами  $r_{bf}$  и  $r_f$ , определяемый из выражения:

$$\cos \varphi_f = r_{bf} / r_f \quad (12)$$



Аналогично находим значения угла  $\varphi$  для точек профиля на головке  $\varphi_a$  зуба фрезы и его делительном цилиндре  $\varphi_m$  из выражений:  $\cos \varphi_a = r_{ba} / r_a$ ;  $\cos \varphi_m = r_{bm} / r_{m0}$ .

Максимальный радиус  $r_{wf}$  шлифовального круга принимаем либо из технических данных шлифовально-затыловочного станка: 60 мм для станков диапазона обработки фрез диаметром  $d_{a0}$  до 160 мм с модулем до 12 мм, 87 мм для затылования фрез больших размеров; либо путем измерения текущего рабочего диаметра шлифовального круга.

Далее определяем угол  $\psi_f$  между касательной и межосевым перпендикуляром из выражения:

$$\operatorname{tg} \psi_f = r_{bf} / t_f, \quad (13)$$

и величину  $a_{w0}$  находим по формуле:

$$a_{w0} = r_{bf} / \sin \psi_f. \quad (14)$$

При найденном из (14) значении  $a_{w0}$  межосевого расстояния шлифовального круга и фрезы находим величины углов  $\psi_a$ ,  $\psi_m$  между касательными к основному цилиндрам и межосевым перпендикуляром для точек контакта на цилиндрах головок и делительном:

$$\psi_a = \arcsin(r_{ba} / a_{w0}), \quad \psi_m = \arcsin(r_{bm} / a_{w0}). \quad (15)$$

Проведем оси координат: начало осей в точке  $O_1$  проекции оси фрезы, ось  $X$  – по направлению межосевого перпендикуляра, ось  $Y$  – перпендикулярно оси  $X$ . Координаты реперных точек линии контакта на цилиндрах: впадин ( $f$ ) радиусом  $r_f = r_{m0} - m_o$ , делительном ( $m_o$ ) радиусом  $r_{m0}$  и головок ( $a$ ) радиусом  $r_{a1} = r_{m0} + m_o$ , – определяем выражениями:

$$\begin{aligned} X_f &= r_f \sin(\varphi_f + \psi_f); & Y_f &= r_f \cos(\varphi_f + \psi_f); \\ X_m &= r_{m0} \sin(\varphi_{m0} + \psi_{m0}); & Y_m &= r_{m0} \cos(\varphi_{m0} + \psi_{m0}); \\ X_a &= r_{a1} \sin(\varphi_a + \psi_a); & Y_a &= r_{a1} \cos(\varphi_a + \psi_a). \end{aligned} \quad (16)$$

Аналогичным образом могут быть определены координаты любых точек внутри линии контакта и, соответственно, длина любого участка линии контакта.

### А теперь, внимание!

Для той боковой стороны, где угол подъема затылованной поверхности больше угла подъема производящей поверхности, эта же линия контакта имеет место при установке оси шлифовального круга на угол  $\beta_{w1}$  наклона, определяемый из выражения:

$$\operatorname{tg} \beta_{w1} = (p + k \operatorname{tg} \alpha_{xR}) / a_{w0}, \quad (17)$$

где значение  $a_{w0}$  определено из (14). Это значение  $\beta_{w1}$  позволяет сохранить преимущества наладки при  $\beta_w = 0$  – профилировать рабочую поверхность шлифовального круга вдоль линии контакта и приблизить угол установки оси круга к углу подъема шлифуемой поверхности зубьев фрезы. Величина угла  $\beta_{w1}$  превышает угол подъема производящей поверхности фрезы на ее делительном цилиндре, но меньше угла  $\gamma_f$  подъема производящей поверхности на цилиндре впадин при модулях от 3 до 11 мм, при модулях до 2,5 мм незначительно превышает  $\gamma_p$ , что позволяет использовать эту наладку шлифовально-затыловочного станка практически без ограничений.

Для противоположной боковой стороны зуба фрезы (левая сторона зуба у правозаходной фрезы) установку угла  $\beta_{w1}$  на величину:

$$\operatorname{tg} \beta_{w1} = (p - k \operatorname{tg} \alpha_{xL}) / a_{w0}, \quad (18)$$

можно рекомендовать только для фрез, у которых ( $p > k \operatorname{tg} \alpha_{L0}$ ), – в том числе однозаходные фрезы с модулями от 12 мм. Тогда направление затылованной поверхности совпадает с направлением производящей поверхности,  $\beta_{w1} > 0^\circ$ , и при такой наладке осевое сечение шлифовального круга (линия его профилирования) также совпадает с линией контакта круга и шлифуемых поверхностей.

При соотношении параметров  $p < k \operatorname{tg} \alpha_{L0}$  (см. табл. 2, столбец  $Z_1$ ) значение  $\beta_{w1}$  из (18) для этого случая – **отрицательно**, и такая наладка **не рекомендуется** из-за усугубления опасности подрезания верхней части следующего зуба.

### Заключение

Найден метод построения линий контакта между поверхностями шлифовального круга и шлифуемыми боковыми поверхностями зубьев зуборезных червячных фрез на основе рассмотрения каждой из точек осевого профиля затылуемой поверхности, как элемента эвольвентной винтовой поверхности.

Определено, что все касательные к основным цилиндрам, соответствующие точкам осевого профиля шлифуемой поверхности, сходятся в одной точке межосевого перпендикуляра, и огибающая линия точек пересечения этих касательных соответствующих цилиндров профиля определяет линию контакта поверхностей шлифовального круга и зубьев фрезы. Приведена методика расчета координат точек линий контакта.

Протяженность и конфигурация линии контакта внутри крайних точек шлифуемого профиля с изменением угла  $\beta_w$  наклона оси шлифовального круга практически не меняется, так как неизменен центральный угол, охватывающий линию контакта поверхности

круга и шлифуемой поверхности. Изменяется ее наклон и расстояние относительно межосевого перпендикуляра.

### Литература

1. **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.
2. **Сандлер А. И.** Функционально-ориентированная технология затылования зубьев зуборезных червячных фрез нового стандарта // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 1(127). С. 37–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-1-37-48.
3. **Сандлер А. И., Лагутин С. А., Верховский А. В.** Производство червячных передач / Под общ. ред. С.А.Лагутина. М.: Машиностроение, 2008. 272 с.
4. **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.
5. **Мишкин С. В.** Профилирование и оптимизация установок шлифовальных кругов для затылования прецизионных червячных фрез // Известия вузов. Машиностроение. 2007. № 11. С. 63–68.
6. **Андросов С. П., Визигин Д. В.** Моделирование затылования зубьев червячной модульной фрезы // Обработка металлов (Технология, Оборудованием, Инструменты). 2013. № 3(60). С. 41–46.
7. **Хейфец А. Л.** 3D-модель червячной фрезы // Обработка металлов (Технология, Оборудованием, Инструменты). 2013. № 3(60). С. 47–53.
8. **Berbinschi S., Teodor V., and Oancea N.** 3D Graphical Method for Profiling Gear Hob Tools // Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2013, 64 (1–4), pp. 291–304.
9. **Jian Jun Hao, Shuai Shuai Ge, Xi Hong Zou, Chang Cheng** Research on NC Relieving of Annular Worm Gear Hob // Periodical: Advanced Materials Research (Volume 502). 2012, pp. 421–425. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.502.421>
10. **Литвин Ф. Л.** Теория зубчатых зацеплений. М.: Наука, 1968. 584 с.

### Автор

**Сандлер Александр Исерович** – кандидат технических наук, независимый эксперт



## Металлообработка. Сварка – Урал

международная выставка технологий,  
оборудования, материалов для машиностроения,  
металлообрабатывающей промышленности  
и сварочного производства



12–15 марта 2024  
Екатеринбург

крупнейший  
специализированный  
региональный проект в России

(342) 264-64-27  
[egorova@expoperm.ru](mailto:egorova@expoperm.ru)  
[metal-ekb.expoperm.ru](http://metal-ekb.expoperm.ru)





**04-06**  
**июня 2024**

Москва  
ЦВК «Экспоцентр»



**АРСС**

При поддержке:  
Ассоциация развития  
стального строительства



Российский союз  
поставщиков  
металлопродукции

9-я Международная  
специализированная выставка

# Металло Конструкции 2024



12+

Место проведения:



Генеральный  
информационный партнер:



Организатор:



[www.mc-expo.ru](http://www.mc-expo.ru)  
+7 (495) 734-99-66