

УДК 621.914.6; 621.833.1

DOI: 10.30987/article_5d2df088619b13.24122927

А.И. Сандлер, к.т.н., ген. директор
(ООО «СЭЛЭКШЕН», 127540, Москва, ул. Дубнинская, 12-1- 269),
С.А. Лагутин, к.т.н.
(ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения»,
144005, г. Электросталь, Московская обл., ул. Красная, 19)
E-mail: sandli@aha.ru; sergeylagutin@gmail.com

Функционально-ориентированная технология затылования червячных фрез для нарезания колес к передачам с зацеплением Новикова

Производящий червяк червячной фрезы для нарезания зубчатых передач Новикова с двумя линиями зацепления имеет профиль, переменный не только по радиусу кривизны, но и по ее знаку. Разработана технология затылования боковых поверхностей зубьев этих фрез дисковым инструментом (шлифовальным кругом), функционально-ориентированная на обеспечение задних углов зубьев фрезы и качества реализации исходного контура передачи производящим червяком фрезы.

Ключевые слова: червячная фреза; шлифование; затылование; затылованная поверхность зубьев; зубчатые колеса передачи Новикова.

A.I. Sandler, Can. Sc. Tech., Director-General
(“SELECTION” Co., 12-1-269, Dubninskaya Str., Moscow, 127540)
S.A. Lagutin, Can. Sc. Tech
(PC “Electrostal Plant of Heavy Engineering”, 19, Krasnaya Str., Electrostal, 144005)

Function-specific technology of hobbing cutter relieving for wheel hobbing gears with Novikov mesh

A productive worm of a hob for cutting Novikov gearing with two mesh lines has a profile variable not only by a curvature radius, but also by its sign. A procedure is developed for relieving side surfaces of teeth of these milling cutters by a disk tool (abrasive disk) function-specific to ensure back angles of a milling cutter and realization quality of an initial contour of a gear with the production worm of a milling cutter.

Keywords: hobbing cutter; grinding; relieving; relieved surface of teeth; cog-wheels of Novikov gearing.

Введение

При шлифовании винтовых и затылованных поверхностей дисковыми шлифовальными кругами имеет место неизбежное отклонение профиля шлифуемой поверхности от профиля шлифовального круга, которое получило название органической погрешности [1].

Для винтовых и затылованных поверхностей с профилем существенной и переменной кривизны задачу минимизации или устранения органической погрешности пытались решить неоднократно. Известным примером решения такой задачи является способ формирования профиля червяка для передач типа ZT2, предложенный в монографии Ф.Л. Литвина [Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Наука, 1968. – 584 с.]. Заданным был принят осевой профиль

шлифовального круга в виде дуги окружности. А затем из условия, что именно этот профиль является линией контакта круга и шлифуемой поверхности (условие полного устранения органической погрешности), отыскивались угол установки оси круга и осевой профиль витка червяка. Очевидно, что для создания червячной фрезы с затылованными боковыми поверхностями зубьев и с заданным профилем производящей рейки (исходного контура нарезаемого колеса), необходимо решить обратную задачу – найти профиль шлифовального круга и параметры его установки в наладке затыловочного станка.

В работах [1, 2] было предложено решение аналогичной задачи применительно к выпуклому профилю витка червяка и соответствующей червячной фрезы для нарезания червячного колеса к передаче жидкостного тре-

ния. Задается осевой профиль витка рабочего червяка (или боковой поверхности зубьев червячной фрезы) с существенной и переменной кривизной и таким же принимается профиль шлифовального круга в этом осевом сечении червяка. Угол установки оси шлифовального круга определяется из условия, что ось круга пересекает две нормали к осевому профилю витка и находится в плоскости, параллельной оси червяка. Этот метод обеспечивает минимизацию органических погрешностей профилирования витка червяка, боковых поверхностей зубьев червячной фрезы, и, в конечном счете, необходимую идентичность профилей рабочего и производящего червяков.

Возможности наладки шлифовально-затыловочного станка позволяют установить ось шлифовального круга в плоскости не параллельной оси шлифуемого изделия, что, во-первых, обеспечивает перспективы уменьшения органической погрешности шлифования затылованных поверхностей, во-вторых, улучшает условия шлифования по ряду параметров. Общие принципы использования этого метода технологического профилирования применительно к затылованию червячных фрез для нарезания колес передач Новикова рассматривались в работе [3]. Особенностью этих червячных фрез является существенная кривизна профиля производящей рейки, переменная не только по радиусу кривизны, но и по ее знаку.

В настоящей работе решены основные вопросы технологии затылования шлифованием боковых поверхностей фрез для колес передач с зацеплением Новикова, функционально ориентированные на решение следующих задач: обеспечение задних углов зубьев, необходимых для износостойкости режущих кромок зубьев фрезы, минимизация органической погрешности профиля производящей рейки (исходного контура) для обеспечения качества в соответствии с ГОСТ 15023-76 «Передачи Новикова цилиндрические с двумя линиями зацепления. Исходный контур», определение основных параметров наладки шлифовально-затыловочного станка и профиля шлифовального круга.

Зацепление Новикова.

Параметры исходного контура

Идея М.Л. Новикова состояла в синтезе сопряженных зацеплений с первоначально точечным касанием поверхностей, имеющих повышенную нагрузочную способность. Первоначально им были предложены косозубые ци-

линдрические передачи с заплосленным зацеплением, в которых дугами окружностей были очерчены торцовые профили зубьев: выпуклый на шестерне и вогнутый на колесе [Новиков М.Л. Зубчатые передачи с новым зацеплением. – М.: Изд-во ВВИА им. Жуковского, 1958. – 186 с.]. Позднее В.Н. Кудрявцев показал возможность синтеза таких передач на основе двух неконгруэнтных производящих реек и нарезания их методом обкатки двумя червячными фрезами: одной – для шестерни с выпуклыми профилями зубьев, другой – для колеса с вогнутыми зубьями [Кудрявцев В.Н. К вопросу о зацеплении Новикова. Исследование и освоение зубчатых передач с зацеплением Новикова. – М.: Изд-во АН СССР. 1960. – С.33-44.]. В настоящее время разработаны, стандартизованы и широкое применение в производстве получили исходные контуры полнопрофильной производящей рейки, позволяющей нарезать оба колеса зубчатой пары с двумя линиями зацепления [4]. В соответствии с ГОСТ 15023-76 такой исходный контур состоит из выпуклого, вогнутого и короткого прямолинейного участка между ними (рис. 1).

На рис. 1 показаны основные параметры исходного контура, значения которых зависят от диапазона модулей. Угол профиля α_k в расчетных контактных точках на головке и ножке зуба для всех вариантов равен 27° . К этим же точкам относятся: координаты h_k – расстояние от делительной прямой; e_k – ширина зуба фрезы на его головке; S_k – ширина впадин на ножках зубьев фрезы; $j_k = (e_k - S_k)$ – разность размеров для образования зазора между зубьями колес. Угол профиля на прямолинейном участке контура α зависит от диапазона модулей и при этом равен $\approx 8^\circ$.

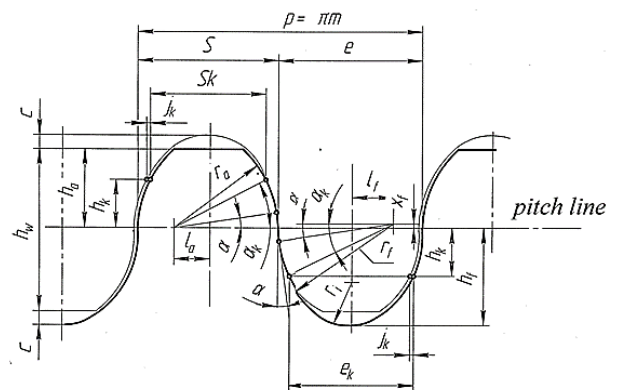


Рис.1. Исходный контур передач Новикова согласно ГОСТ 15023-76

Рабочий участок профиля головки зуба фрезы (или впадины колеса) описан радиусом

r_f , центр кривизны которого отстоит от оси симметрии головки на расстоянии l_f и смещен к оси фрезы относительно делительной прямой на величину x_f . Центр кривизны дуги рабочего участка впадины зуба фрезы радиусом r_a находится на делительной прямой, на расстоянии l_a от оси симметрии впадины. Размеры по делительной прямой: e – толщина зуба фрезы; S – ширина впадин. Высота h_f головки зуба фрезы от делительной прямой в сумме с глубиной впадины ($h_a + c$) составляют номинальную высоту зуба фрезы, где: h_a – высота головки зуба колеса; c – радиальный зазор между колесом и фрезой при зубонарезании. Указаны также h_w – высота рабочего участка зубьев колеса в передаче; r_i – радиусы дуговых участков переходных кривых на головке зуба фрезы и во впадине.

Расчет колес для передач Новикова производят по ГОСТ 17744-72 «Передачи Новикова цилиндрические с двумя линиями зацепления. Расчет геометрии».

Параметры червячной фрезы

Производящая рейка (исходный контур зубьев нарезаемого колеса) зуборезных червячных фрез лежит в нормальном сечении производящего червяка, которое касательно к винтовой передней поверхности, и для однозаходных фрез практически совпадает с ней в зоне профилирования. При зубофрезеровании плоскость производящей рейки устанавливают перпендикулярно направлению зубьев нарезаемого колеса, т.е. угол установки оси фрезы на зубофрезерном станке увеличивают по отношению к углу наклона зубьев колеса на величину угла наклона передней поверхности фрезы.

При затыловании зубьев червячной фрезы ее ось устанавливают в центры шлифовально-затыловочного станка, в горизонтальной плоскости. Для достоверного воспроизведения профиля производящей рейки в нормальном сечении фрезы параметры исходного контура необходимо пересчитать в параметры осевого сечения затылуемых поверхностей зубьев, предварительно определив осевой профиль винтовой поверхности, на которой расположены режущие кромки зубьев фрезы.

Основными параметрами червячной фрезы являются: осевой модуль m ; радиус r_F делительного цилиндра; число заходов (витков) z_0 ; винтовой параметр $p = 0,5 m z_0$ производящей поверхности; число зубьев z_ϕ в торцовом сечении.

В системе координат осевого сечения фрезы, где ось Z направлена по оси фрезы, а ось X совмещена с осью симметрии зуба фрезы, координаты расчетных точек осевого профиля (индекс «0») винтовой поверхности режущих кромок зубьев связаны с координатами профиля производящей рейки (индекс « n ») зависимостями:

– для точек на ножке зуба ($i = 1$): $x_{01} = x_{n1}$;
 $z_{01} = z_{n1} / \cos g_{x1}$; $\text{tg } \alpha_{01} = \text{tg } \alpha_{n1} / \cos g_{x1}$,
 где $z_{n1} = 0,5\pi m_n + l_a - (r_F - x_{n1}) \text{ctg } \alpha_{n1}$;
 $g_{x1} = \text{arctg } p / x_{01}$;

– для точек на головке зуба ($i = 2$): $x_{02} = x_{n2}$;
 $z_{02} = z_{n2} / \cos g_{x2}$; $\text{tg } \alpha_{02} = \text{tg } \alpha_{n2} / \cos g_{x2}$,
 где

$z_{n2} = (x_{n2} - r_F + x_f) \text{ctg } \alpha_{n2} - l_f$; $g_{x2} = \text{arctg } p / x_{02}$. (1)

Заданный угол α нормального профиля прямолинейного участка следует заменить на угол α_1 осевого профиля прямолинейного участка по известной [1, 2] формуле:

$$\text{tg } \alpha_1 = \text{tg } \alpha / \cos \gamma_1, \quad (2)$$

γ_1 – угол подъема винтовой поверхности режущих кромок на делительном цилиндре фрезы.

Радиусы r_{fa} кривизны дуговых профилей головки и ножки зуба в нормальном сечении заменяются на соответствующие радиусы r_{ofa} в осевом сечении, которые с приближением, достаточным для расчета однозаходных фрез, определяются по теореме Менье из выражения:

$$r_{ofa} = r_{fa} / \cos \gamma_1. \quad (3)$$

Радиусы r_i дуговых профилей переходных кривых на головке и во впадине зуба в нормальном сечении пересчитываются на соответствующие радиусы r_{0ic} в осевом сечении по формуле Эйлера:

$$r_{0ic} = r_i / \cos^2 \gamma_{ic}. \quad (4)$$

где γ_{ic} – углы подъема производящей поверхности на вершине головки и впадине ножки.

Толщину витка b в осевом сечении следует определить на минимальном шлифуемом радиусе r_{\min} фрезы, исходя из толщины b_n нормального сечения в крайней точке обработки по формуле

$$b = b_n / \cos \gamma_{(r \min)}, \quad (5)$$

где $\gamma_{(r \min)} = \text{arctg } (p / r_{\min})$ – угол подъема винтовой поверхности режущих кромок на цилиндре впадин активной поверхности зубьев.

Найденные параметры осевого сечения винтовой поверхности режущих кромок одновременно являются параметрами осевого сечения затылованных поверхностей зубьев.

Для наглядности обратимся к рис. 2, на котором показан пример исходного контура для передач с модулем $m_n = 12$ мм.

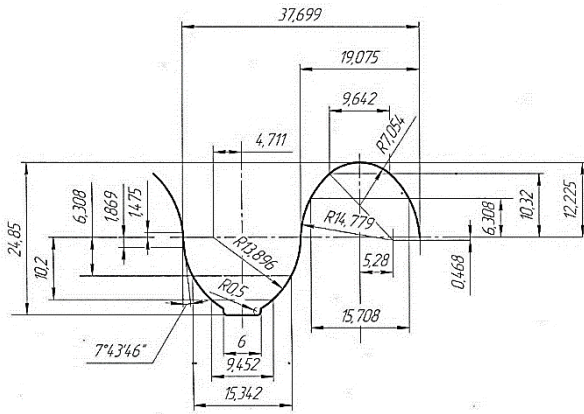


Рис. 2. Пример исходного контура для модуля $m = 12$ мм

Для полнопрофильных контуров производящей рейки зацепления Новикова делительная прямая делит высоту зуба практически пополам. Рабочий участок зубьев фрезы (см. рис. 2) при нарезании зубьев колеса передачи ограничен размерами 10,2 мм на ножке зуба фрезы и 10,32 мм на головке зуба от средней линии профиля производящей рейки. В этих же точках профиля имеет место стыковка радиусных участков (основного профиля и переходных кривых) на головке и ножке зуба. Толщина зуба в нормальном сечении на минимальном диаметре обработки составляет $b_n = 31,7$ мм.

Основные параметры червячной фрезы: наружный диаметр 180 мм; число заходов фрезы $z_0 = 1$; число зубьев в поперечном сечении $z_\phi = 10$; делительный диаметр 155,55 мм и ее радиус $r_F = 77,775$ мм; спад кулачка затылования на наружном цилиндре $K = 10$ мм.

Расчетные параметры: осевой модуль фрезы $m = 12,038$ мм; угол подъема производящего червяка на делительном цилиндре $\gamma_F = 4,425^\circ$; винтовой параметр производящего червяка $p = 6,019$ мм; параметр затылования $k = Kz_\phi/2\pi = 15,915$ мм; минимальный радиус шлифования зубьев (на цилиндре впадин) $r_{\min} = 66,215$ мм; толщина зуба на минимальном радиусе шлифования (с учетом угла подъема витка на этом цилиндре $5,194^\circ$) $b = 31,83$ мм, отсюда $b/2 = 15,915$ мм.

Параметры профиля осевого сечения производящей поверхности фрезы:

минимальный угол профиля зуба (на прямолинейном участке) $\alpha_{1\min} = 7,7523^\circ$; радиусы кривизны профиля рабочего участка – на головке зуба $r_{0f} = 14,823$ мм; на ножке зуба $r_{0a} = 13,938$ мм; радиусы кривизны переходных кривых – на головке зуба $r_{if} = 7,096$ мм, во впадине $r_{ia} = 7,002$ мм; углы профиля в характерных точках рабочего участка:

- в точке сопряжения радиусов r_{0f} и r_{if} на головке зуба $\alpha_{0f} = 46,95^\circ$;
- в контактной точке на головке зуба $\alpha_{01} = 27,35^\circ$;
- в точке сопряжения радиусов r_{0a} и r_{ia} на ножке зуба $\alpha_{0a} = 47,34^\circ$;
- в контактной точке на ножке зуба $\alpha_{02} = 27,08^\circ$.

Параметры радиально-осевого затылования

В отличие от затылования зубьев фрез с прямолинейным профилем, для криволинейных профилей осевая составляющая движения затылования переменна вдоль профиля, так как переменными являются текущий угол профиля α_0 осевого сечения и, соответственно, боковой угол затылка λ_ϕ [1, 2]. При затыловании фрез с большим перепадом углов профиля нельзя применять чисто радиальное затылование ($\phi_c = 0^\circ$). Это обусловлено, во-первых, недостаточностью задних углов при малых углах профиля $\alpha_{0\min}$ вблизи делительного цилиндра, и, во-вторых, большим смещением профиля затылованной поверхности относительно делительной прямой на радиусных участках с большими углами профиля, которое проявится при переточках фрезы.

Как было указано ранее, угол профиля на прямолинейном участке профиля затылуемой поверхности зубьев фрезы $\alpha_0 \approx 8^\circ$, в связи с чем на этом участке задние углы минимальны, что в процессе резания существенно снижает износостойкость фрез в целом, поскольку именно на этом участке интенсивно образуются площадки износа [5]. Для обеспечения на этом участке зубьев необходимых задних углов и уменьшения искажений профиля производящей рейки при переточках фрезы требуется применять радиально-осевое затылование.

В общем случае радиально-осевого затылования зубьев червячной фрезы [1, 2] направление движения затылования составляет с перпендикуляром к оси шлифуемой фрезы угол ϕ_c , что обеспечивает получение заданного заднего угла λ_ϕ около режущих кромок зубьев фрезы. Ось O_n-O_n шлифовального круга расположена в вертикальной плоскости, которая развернута относительно оси O_1-O_1 затылуемой фрезы под углом ϕ_0 . К горизонтальной плоскости ось O_n-O_n наклонена на угол β_n . Такой способ установки оси шлифовального круга позволяет исключить большие перепады кривизны шлифующей поверхности круга, улучшить условия шлифования изделия и увеличить срок эксплуатации шлифовального

круга.

В процессе затылования фреза вращается вокруг своей оси O_1-O_1 с угловой скоростью ω_1 , шлифовальный круг перемещается вдоль оси фрезы со скоростью $p\omega_1$ и совершает возвратно-поступательное движение с рабочей скоростью $k\omega_1$, где $k = Kz_\phi/2\pi$ – параметр затылования; K – величина спада архимедовой спирали кулачка механизма затылования на угловом шаге зубьев фрезы. При этом салазки затыловочного суппорта развернуты относительно перпендикуляра к оси фрезы на угол φ_c . Текущий радиус r_i круга определяется в точке его контакта с зубом фрезы на ее текущем цилиндре. За исходное положение круга целесообразно принять касание его максимального радиуса $r_{им}$ с минимальным радиусом обрабатываемой поверхности изделия $r_{мин}$ в плоскости, касательной к передней поверхности зубьев фрезы.

При радиально-осевом затыловании зубьев угол γ_{0i} подъема затылованной поверхности в каждой из точек осевого профиля определяется из выражения [1, 2]:

$$\text{tg } \gamma_{0i} = [p \pm k \sin(\alpha_{0i} + \varphi_c) / \cos \alpha_{0i}] / x_{0i}. \quad (6)$$

Знак «+» в квадратных скобках относится к той стороне зубьев, где угол подъема затылованной поверхности больше угла подъема производящей поверхности режущих кромок зубьев фрезы, знак «-», соответственно, к противоположной стороне зубьев; x_{0i} – радиус расположения расчетной точки на затылуемой поверхности – определяется из чертежа изделия. Из (6) следует, что на величину углов γ_{0i} подъема затылованной поверхности влияет угол φ_c установки затыловочного суппорта, который обеспечивает необходимый боковой угол λ_6 затылка, определяемый требуемым задним углом резания около режущей кромки

зуба. Для фрез с переменной кривизной профиля этот угол определяют для того участка профиля, где имеет место наименьшее значение угла α_{0i} , т.е. для данного типа фрез – для прямолинейного участка вблизи делительного цилиндра, где в рассматриваемом примере $\alpha_{0\min} = 7,7523^\circ$.

Расчет угла φ_c установки затыловочного суппорта станка

ГОСТ 9324-80 «Фрезы червячные чистовые однозаходные для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем» для нарезания колес с модулем 12 мм из термически упрочняемых сталей рекомендует параметры радиального затылования, обеспечивающие нормальный задний угол на делительном цилиндре $\approx 4^\circ$. Исходя из этой рекомендации, для рассматриваемого типа фрез устанавливаем следующую зависимость, обеспечивающую определение φ_c с достаточной для практических расчетов точностью:

$$(\text{tg } \gamma_{0F} - \text{tg } \gamma_{xF}) \cos \alpha_{0\min} = \text{tg } 4^\circ. \quad (7)$$

Раскрывая значения $\text{tg } \gamma_{0F}$ из (6) и $\text{tg } \gamma_{xF} = p/r_F$, получим следующее выражение:

$$\sin(\alpha_{0\min} + \varphi_{cR,L}) = 0,44 r_F / (Kz_\phi), \quad (8)$$

из которого определяем величину φ_c . Индексы R,L относятся к правой и левой сторонам зуба фрезы. Для рассмотренного выше примера параметров фрезы с $\alpha_{0\min} = 7,7523^\circ$ получаем $\varphi_{cR,L} = 12,229^\circ$. Учитывая цену деления ($0,5^\circ$) угла поворота затыловочного суппорта, устанавливаем по правилам округления величину $\varphi_{cR,L} = 12^\circ$.

В табл. 1 показаны расчетные данные параметров профиля зуба фрезы и углов подъема затылованной поверхности зубьев в семи характерных точках профиля $i = 1 \dots 7$:

1. Параметры основных точек профиля зуба фрезы (для приведенного примера)

Номера точек профиля	Радиус точки профиля $x_i = r_i$, мм	Угол профиля α_{0i} в осевом сечении, °	Угол подъема винтовой поверхности режущих кромок зубьев γ_i , °	Угол подъема затылованной поверхности – правая сторона зубьев γ_{0R} , °	Угол подъема затылованной поверхности – левая сторона зубьев, γ_{0L} , °
1	67,575	47,338	5,09	21,207	- 11,853
2	71,467	27,079	4,814	13,598	- 4,200
3	75,906	7,752	4,587	8,576	0,446
4	77,775	7,752	4,425	8,373	0,435
5	79,25	7,752	4,343	8,219	0,427
6	84,083	27,35	4,094	11,679	- 3,635
7	88,095	46,951	3,909	16,439	- 9,001

Примечания: 1 – граница активного участка профиля на ножке зуба; 2 – точка контакта на ножке зуба фрезы; 3 – сопряжение дугового вогнутого участка с прямолинейным участком; 4 – делительный цилиндр фрезы; 5 – сопряжение прямолинейного и дугового участков на головке зуба; 6 – контактная точка на головке зуба; 7 – граница активного участка профиля на головке зуба.

На рис. 3 и 4 для обеих сторон зубьев фрезы представлены графики зависимости углов γ_{0i} подъема затылованной поверхности по формуле (6) от радиуса $x_{0i} = r_i$ точки профиля фрезы с учетом угла α_{0i} его профиля, при $\varphi_c = 12^\circ$.

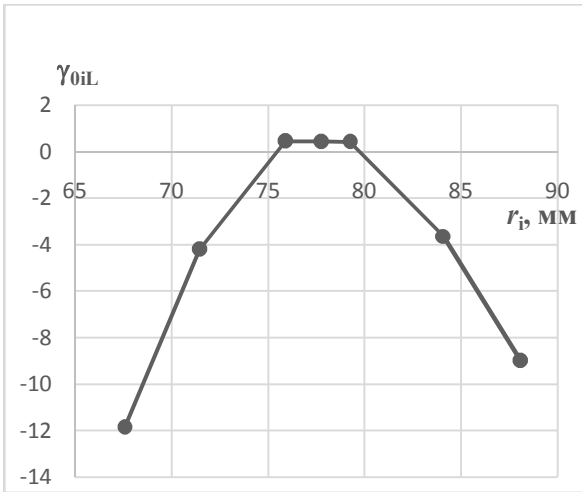


Рис. 3. График функции $\gamma_{0iR} = f(r_i)$ – правая сторона зуба

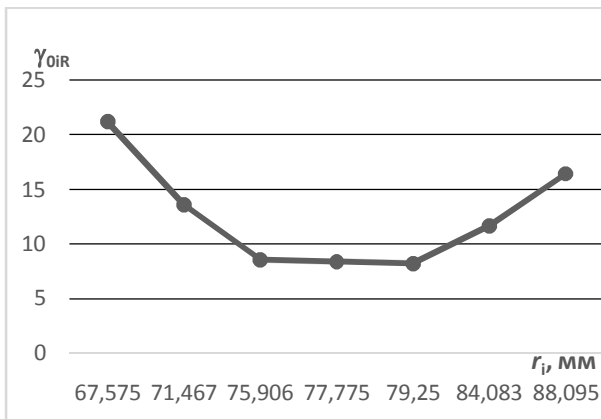


Рис. 4. График функции $\gamma_{0iL} = f(r_i)$ – левая сторона зуба

Анализ приведенных расчетных данных показывает, что боковым поверхностям зубьев такой фрезы органически присуще наличие парных точек с равными углами подъема затылованной поверхности, но величины этих углов существенно отличаются от угла подъема винтовой производящей поверхности. В этой связи еще одной задачей при выборе параметров затылования является исключение подрезания режущих кромок зубьев.

Методика выбора исходных точек для построения расчетных нормалей

Выбор двух точек A_1 и A_2 осевого профиля затылуемой поверхности с параметрами: $A_1(x_{01}, z_{01}, \alpha_{01})$ и $A_2(x_{02}, z_{02}, \alpha_{02})$, должен удовлетворять двум условиям. Во-первых, участок профиля между выбранными точками должен

охватывать рабочую часть зуба, включая контактные точки ($\alpha_0 \approx 27^\circ$). Во-вторых, должно быть исключено подрезание режущих кромок зубьев. Для этого на правой стороне зубьев правозаходной фрезы угол β_n установки оси шлифовального круга в пересчете на плоскость, параллельную оси фрезы, не должен существенно превышать максимальный угол подъема производящей поверхности, а при затыловании противоположной стороны зуба не должен быть существенно меньше угла подъема винтовой поверхности режущих кромок зубьев на головке зуба.

Точку A_1 следует выбирать на ножке зуба фрезы, точку A_2 , соответственно, – на его головке. Проведенное на конкретных примерах исследование (см. далее пример расчета) показало, что указанным условиям наиболее полно удовлетворяет выбор точки A_1 в расчетной контактной точке профиля на впадине зуба – на вогнутом дуговом участке при $\alpha_{01} \approx 27^\circ$ (точка 2 в табл. 1). В качестве точки A_2 следует выбирать сопряжение выпуклого дугового участка с переходной кривой на головке зуба, при $\alpha_{02} \approx 47^\circ$ (точка 7 в табл. 1).

В этом случае величина угла β_n наклона оси круга получается меньше наименьшего из значений угла γ_{0i} в выбранных расчетных точках.

Определение угла β_n наклона оси шлифовального круга

Схема для расчета угла β_n представлена на рис. 5.

В расчетной системе координат XYZ (рис. 5) ось Z направлена по оси фрезы, ось X совмещена с осью симметрии витка; XZ – плоскость осевого сечения фрезы; ось Y перпендикулярна этому сечению. Плоскость расположения оси шлифовального круга параллельна оси Y, пересекает ось X на расстоянии a от оси Z и составляет с этой осью угол $\varphi_0 \neq 0$.

Как показано на нижней проекции рис. 5, значение a определяется выражением:

$$a = r_{\min} + 0,5b \operatorname{tg} \varphi_0 + r_{\text{вм}} / \cos \varphi_0, \quad (9)$$

где b – толщина шлифуемого витка червяка при минимальном радиусе r_{\min} .

Уравнение плоскости, содержащей ось шлифовального круга, записываем в виде:

$$x(z) = a - z \operatorname{tg} \varphi_0. \quad (10)$$

Координаты z_i пересечения нормалей, восстановленных из точек A_1 и A_2 , с плоскостью оси шлифовального круга:

$$z_{i(1,2)} = \frac{a - x_{0i} + z_{0i} \operatorname{tg} \alpha_i}{\operatorname{tg} \alpha_i + \operatorname{tg} \varphi_0}. \quad (11)$$

Две другие координаты каждой из точек пересечения нормалей с этой плоскостью оп-

ределяем через z_i ; координаты $y_{i(1,2)}$ определяем с учетом вида С (фронтальная проекция):

$$x_{i(1,2)} = a - z_i \operatorname{tg} \varphi_0; y_{i(1,2)} = (z_i - z_{0i}) \operatorname{tg} \gamma_{0i} \quad (12)$$

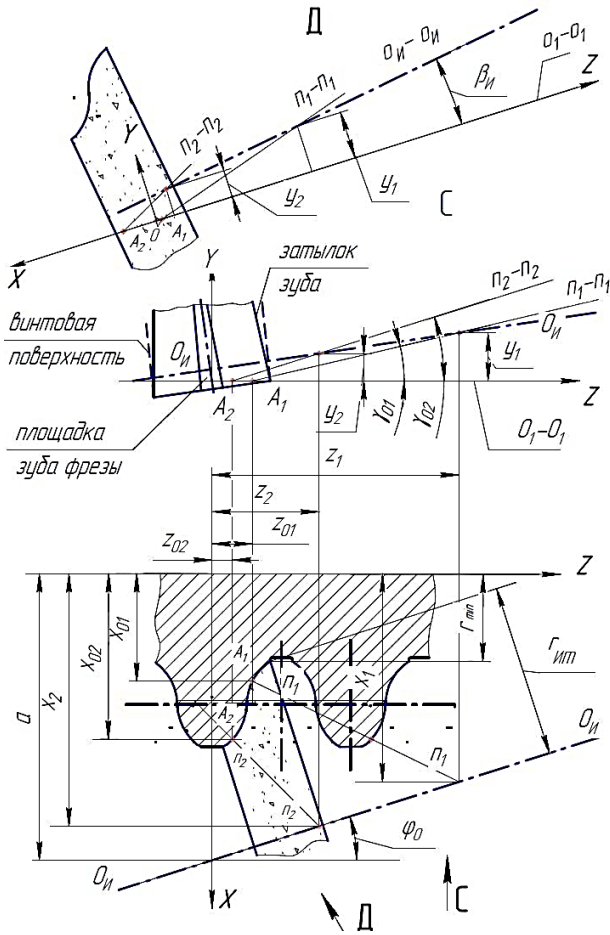


Рис. 5. Расчетная схема к определению угла β_n установки оси шлифовального круга при радиально-осевом затыловании поверхностей с профилем переменной кривизны

Угол β_n наклона оси шлифовального круга определяем в функции тангенса (из вида Д, на плоскость расположения оси шлифовального круга – верхняя проекция) по формуле:

$$\operatorname{tg} \beta_n = \frac{y_1 - y_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \quad (13)$$

Для частного случая затылования с углом $\varphi_0 = 0$ плоскость расположения оси круга параллельна оси изделия, и отстоит от нее на расстоянии:

$$a = r_{i \min} + r_{um} \quad (14)$$

Координаты точек пересечения нормалей с плоскостью, содержащей ось шлифовального круга, принимают вид:

$$\begin{aligned} x_{i(1,2)} &= a; z_{i(1,2)} = z_{0i} + (a - x_{0i}) \operatorname{ctg} \alpha_i; \\ y_{i(1,2)} &= (z_i - z_{0i}) \operatorname{tg} \gamma_{0i} = (a - x_{0i}) \operatorname{tg} \gamma_{0i} \operatorname{ctg} \alpha_i. \end{aligned} \quad (15)$$

Выбор угла φ_0 для затылования боковых поверхностей зубьев

Поворот оси фрезы на угол φ_0 улучшает условия шлифования за счет увеличения кривизны поверхности круга в точках контакта с кругом, уменьшает разность между величиной угла β_n наклона оси круга и углами подъема винтовой линии режущих кромок зубьев фрезы. Выбор величины угла φ_0 определяется двумя ограничениями. С одной стороны, необходимо минимизировать указанную разность углов β_n и γ_{0i} в пересчете на плоскость, параллельную оси фрезы. С другой стороны, величина φ_0 не должна приводить к подрезанию режущих кромок зубьев на противоположной стороне витка производящей поверхности, т.е. шлифовальный круг должен входить во впадину без повреждения соседнего по впадине зуба.

Рассмотрим этот вопрос более подробно. Подрезание противоположной стороны витка режущих кромок гарантировано исключается, если минимальное расстояние между обратной (плоской) стороной шлифовального круга и противоположной стороной витка производящей поверхности имеет место напротив наиболее выступающей точки на головке зуба фрезы. Такой точкой является контактная точка на головке зуба с углом профиля $\approx 27^\circ$. Это означает, что сумма угла φ_0 и проекции φ_β угла, образованного отклонением угла β_n от угла γ_i подъема производящей поверхности в этой точке на головке зубьев, не должна превышать величины 27° . То есть:

$$\varphi_0 + \varphi_\beta \leq 27^\circ \quad (16)$$

Наиболее опасной для возникновения подрезания режущих кромок зубьев соседнего витка является та зона, где тело круга начинает сближаться с противоположной стороной витка из-за разности угла β_n установки оси круга и угла подъема производящей поверхности режущих кромок зубьев. Эта зона расположена между горизонтальным осевым сечением фрезы (снизу от него – при обработке правой стороны зубьев) и крайней точкой пересечения торцевых сечений наружного цилиндра круга (радиус r_{um}) и цилиндра радиуса фрезы в контактной точке на головке зуба. Ширину l_{\max} этой зоны определяем по формуле:

$$l_{\max} = r_{um} \sin \psi, \quad (17)$$

$$\psi = \arccos \frac{r_{um}^2 + (r_{um} + r_{i \min})^2 - (r_f + h_k)^2}{2r_{um}(r_{um} + r_{i \min})} \quad (18)$$

Линейное смещение Δ поверхности шлифовального круга на длине l_{\max} к середине впадины [вследствие разности углов установки круга $\beta_{и}$ и угла подъема производящей поверхности на цилиндре фрезы радиусом $(r_F + h_k)$] и его винтовая проекция на осевую плоскость фрезы составят:

– для правой стороны зубьев правой фрезы

$$\Delta \approx l_{\max} [\operatorname{tg} \beta_{иR} \cos \varphi_0 - p/(r_F + h_k)], \quad (19)$$

– для левой стороны зубьев правой фрезы

$$\Delta \approx l_{\max} [p/(r_F + h_k) - \operatorname{tg} \beta_{иL} \cos \varphi_0].$$

Величину φ_β определяем из выражения:

$$\operatorname{tg} \varphi_\beta = \Delta / (r_F + h_k). \quad (20)$$

После этого можно, при необходимости, корректировать величину $\varphi_0 \leq 27^\circ - \varphi_\beta$, увеличивая φ_0 до предельно допустимой величины $\varphi_{0\max}$. Учитывая, что увеличение φ_0 уменьшает необходимую величину угла $\beta_{и}$, такая корректировка целесообразна.

Для предварительного расчета, как показано проведенное исследование, угол φ_0 следует выбирать равным 18° .

В качестве примера проведем расчет параметров затылования $\beta_{и}$ и φ_0 применительно к фрезе, рассмотренной выше, и исследуем особенности получаемых боковых поверхностей.

Исходными точками расчетных нормалей принимаем точки: A_1 (на ножке) – в расчетной контактной точке зацепления при $\alpha_{01} \approx 27^\circ$, A_2 (на головке) – в точке сопряжения основного профиля с переходной кривой при $\alpha_{02} \approx 47^\circ$. Координаты этих точек:

$$A_1(x_{01} = 71,467 \text{ мм}; z_{01} = 11,218 \text{ мм}; \alpha_{01} = 27,079^\circ); A_2(x_{02} = 88,095 \text{ мм}; z_{02} = 4,832 \text{ мм}; \alpha_{02} = 46,951^\circ).$$

Максимальный радиус шлифовального круга принимаем равным $r_{\max} = 60$ мм, минимальный радиус r_{\min} затылуемой поверхности на впадине $r_{\min} = 66,215$ мм, высота шлифуемого профиля зуба фрезы $H_1 = 23,785$ мм.

Расчетная величина угла φ_c поворота затыловочного суппорта для обеспечения заднего угла на средней прямолинейной части профиля – 12° для обеих сторон зубьев производящей поверхности. Величину угла φ_0 предварительно принимаем $= 18^\circ$.

Проведем два расчета – для правой и для левой боковых сторон зубьев. Основные дан-

ные по углам профиля и углам подъема затылованных поверхностей каждой из сторон зубьев правозаходной фрезы приведены табл. 2.

Углы γ_{0i} подъема затылованной поверхности в исходных точках расчетных нормалей A_1 и A_2 : на правой стороне зуба, на которой угол подъема затылованной поверхности больше угла подъема производящего червяка, $\gamma_{01} = 13,598^\circ$, $\gamma_{02} = 16,439^\circ$; на противоположной, левой стороне зуба, $\gamma_{01} = -4,200^\circ$, $\gamma_{02} = -9,001^\circ$.

Отрицательные значения углов γ_{0i} подъема затылованной поверхности в точках дуговых участков профиля левой стороны зуба означают ее превращение на этих участках в аналог левой винтовой поверхности, что свойственно однозаходным фрезам этого типа с нормированным боковым задним углом 4° и более, при количестве модулей в делительном диаметре 12 и более. В табл. 2 сведены основные этапы расчетов с указанием соответствующих формул.

Анализ полученных данных показывает, что кроме точек профиля, из которых восстановлены нормали к профилю затылованной поверхности, контакт в осевой плоскости затылованной поверхности с поверхностью шлифовального круга имеет место еще в 2-х точках. И эти точки находятся вблизи прямолинейного участка профиля, прилегающего к делительному цилиндру.

Для минимизации расхождения профилей шлифуемой поверхности зуба фрезы и шлифующей поверхности круга в окрестности расчетной точки их контакта характеристика поверхности круга, т.е. линия ее касания со шлифуемой поверхностью, должна не пересекать осевое сечение изделия, а касаться его [1, 2]. Это условие выполняется в том случае, если ось шлифовального круга наклонена к осевой плоскости под углом $\beta_{и}$, который определяется в зависимости от угла профиля α_0 , угла подъема γ_{0i} и радиуса r_i затылованной поверхности с учетом угла установки φ_0 оси круга в проекции на горизонтальную плоскость, выражением:

$$\operatorname{tg} \beta_{и} = [p \cos \alpha_0 \pm k \sin(\alpha_0 + \varphi_c)] / [r_i \cos(\alpha_0 + \varphi_0)] = \operatorname{tg} \gamma_{0i} \cos \alpha_0 / \cos(\alpha_0 + \varphi_0). \quad (21)$$

В табл. 3 приведены значения угла $\beta_{и}^\circ$, рассчитанные по этой зависимости для семи характерных точек осевого сечения правой стороны зубьев фрезы.

2. Расчет параметров затылования β_n и φ_0 зубьев фрезы

Основные параметры расчета	Расчетная формула, (№)	Расчетные значения		
		Предварительный расчет		Окончательный расчет
		Правая сторона	Левая сторона зубьев	
φ_0		18°	18°	19°
a , мм	(9)	134,474	134,474	135,152
x_1	(12)	107,762	107,762	107,214
z_1	(11)	82,210	82,210	81,137
y_1	(12)	17,175	- 5,170	- 5,135
x_2	(12)	122,471	122,471	122,441
z_2	(11)	36,941	36,941	36,915
y_2	(12)	9,474	- 5,091	- 5,082
β_n , °	(13)	9,19	- 0,095	- 0,064
ψ , °	(18)	34,645	34,645	34,645
l_{max}	(18)	34,110	34,110	34,110
Δ	(19)	2,807	2,495	2,477
φ_{β_2} , °	(20)	8,928	7,95	7,89
$\varphi_{0\ max}$, °	$\alpha_{0i}^* - \varphi_{\beta}$	18,42	19,4	19,46

Примечания: 1. * Значение $\alpha_{0i} = 27,35^\circ$ – для точки 6 из табл. 1.
 2. Для правой стороны зубьев при предварительном расчете разность значений исходного φ_0 и уточненного $\varphi_{0\ max}$ угла получилась менее 1° , поэтому изменение φ_0 и перерасчет β_n не требуются.
 3. Для левой стороны: окончательный расчет с поправкой угла φ_0 на 1° не приводит к принципиальному изменению угла β_n , а с учетом цены деления $0,1^\circ$ нониуса установки угла β_n оба значения (предварительное и окончательное) округляются до одной величины – $0,1^\circ$.

3. Значения угла β_n , рассчитанные для семи характерных точек осевого сечения правой стороны зубьев фрезы

Номера точек профиля	1	2	3	4	5	6	7
x_{0i} , мм	67,575	71,467	75,906	77,775	79,25	84,083	88,095
α_{0i} , °	47,34	27,08	7,75	7,75	7,75	27,35	46,95
γ_{0i} , °	21,207	13,598	8,576	8,373	8,219	11,679	16,439
β_n , °	32,22	16,96	9,42	9,198	9,029	16,641	25,441

На рис. 6 (верхняя часть) приведена графическая интерпретация зависимости (21) угла β_n от радиуса фрезы для правой стороны зубьев. Проведем две ограничительные прямые: одну через исходные точки A_1 и A_2 нормалей, вторую – горизонтальную при $\beta_n = 9,19^\circ$ (см. табл. 2) до их взаимного пересечения. Участки профиля, попавшие в сектор между ограничительными линиями, практически не имеют органической погрешности, поскольку проведенные через полученную точку пересечения прямые внутри сектора проходят также через две точки осевого профиля затылуемой поверхности. Участок профиля вне полученного сектора имеет минимальную органическую погрешность при заданном профиле шлифовального круга.

В нижней части рис. 6 построена аналогичная зависимость угла β_n от радиуса фрезы для

левой стороны зубьев. Расчетные данные для построения графика приведены в таб. 4.

Также проводим ограничительные прямые через точки графика, соответствующие значениям в исходных точках A_1 и A_2 нормалей, и найденному значению $\beta_n = -0,1^\circ$ (примечание, п. 3 к табл. 2) до их пересечения. Аналогично получаем сектор, внутри которого органическая погрешность шлифуемого профиля практически отсутствует.

Профилирование шлифовальных кругов

Значительные трудности при изготовлении червяков и червячных фрез с профилем существенной и переменной кривизны связаны с тем, что входящие в комплект поставки шлифовальных станков копирные устройства правки круга не приспособлены для воспроиз-

ведения такого профиля. Поэтому необходимо или проектировать специальные накатники, или создавать специальные правящие устройства. В настоящее время, с развитием программного управления, получили определенное распространение правящие устройства с алмазными роликами и программным управлением их перемещения относительно рабочей поверхности шлифовального круга [1, 2].

Характеристика поверхности круга, т.е. линия ее контакта с шлифуемой поверхностью, ориентирована вдоль осевого сечения последней. Поэтому профилирование круга в его осевом сечении с достаточной степенью приближения воспроизводит сечение шлифуемой поверхности, нормальное к винтовой линии с углом подъема равным β_n . То есть, осевой профиль шлифовального круга для однозаходных фрез практически повторяет профиль исходного контура. При этом величину угла α_n профиля круга на прямолинейном участке определяют из выражения:

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \operatorname{tg}(\alpha_{0 \min} + \varphi_0) \cos \beta_n. \quad (22)$$

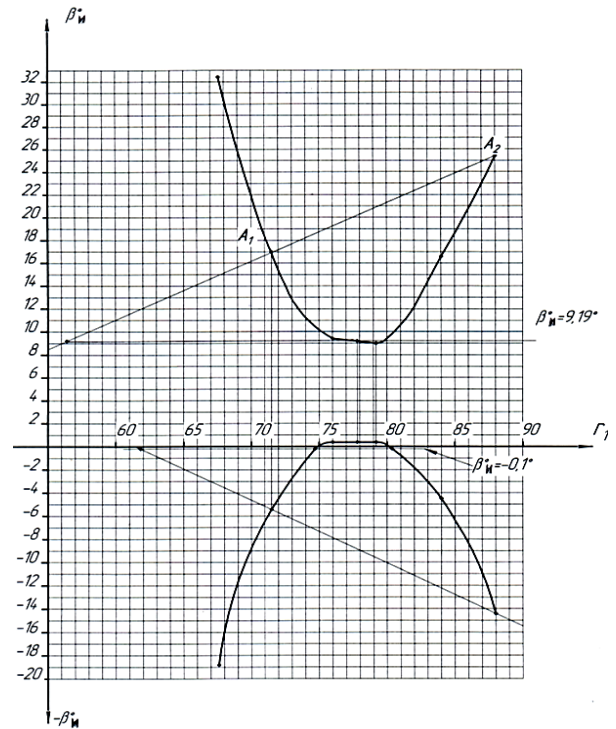


Рис. 6. Зависимость углов β_n от радиуса фрезы $m = 12$ мм для расчетного примера

4. Расчетные данные зависимости угла β_n от радиуса фрезы для левой стороны зубьев

Номера точек профиля	1	2	3	4	5	6	7
x_{0i} , мм	67,575	71,467	75,906	77,775	79,25	84,083	88,095
α_{0i} , °	47,34	27,08	7,75	7,75	7,75	27,35	46,95
γ_{0i} , °	-11,853	-4,2	0,446	0,435	0,427	-3,635	-9,001
β_n , °	-18,822	-5,29	0,491	0,479	0,47	-4,59	-14,325

В общем виде координаты осевого профиля круга, исходя из координат осевого сечения затылованной поверхности зубьев, угол подъема этой поверхности и найденного угла наклона оси шлифовального круга, определяют по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} z_n &= z_{0i} / (\cos \beta_n + \operatorname{tg} \gamma_{0i} \sin \beta_n); \\ x_n &= x_{0i} + z_n^2 \sin 2\beta_n \operatorname{tg} \gamma_{0i} / (4x_{0i}). \end{aligned} \quad (23)$$

Чувствительность к переточкам

При радиально-осевом затыловании поверхностей с профилем переменной кривизны входящая в формулу (6) осевая составляющая параметра затылования

$$k_x = k \sin(\alpha_{0i} + \varphi_c) / \cos \alpha_{0i}$$

переменна вдоль профиля. Поэтому, строго говоря, искажение профиля при переточках зубьев фрезы по передней поверхности является неизбежным. Однако на профиле имеют место одинаковые углы α_{0i} профиля (напри-

мер, в точках сопряжения большого и малого радиусов на головке и на ножке зуба) и углы подъема затылованной поверхности γ_{0i} , в связи с чем, в этих точках и на участках между ними отклонения профиля по мере переточек будут минимальны.

Выводы:

1. Функциональная ориентированность технологии затылования боковых поверхностей зубьев фрез для нарезания колес к передачам с зацеплением Новикова включает обеспечение необходимых задних углов зубьев фрезы и качество реализации исходного контура передачи производящим червяком фрезы.

2. Изменение угла подъема затылованной поверхности зубьев фрез с профилем рейки для передач с зацеплением Новикова имеет параболическую зависимость от радиуса и угла профиля зуба, и затылованным поверхностям зубьев таких фрез органически присуще наличие парных точек профиля с равными

углами подъема.

3. Разработана методика расчета параметров установки, движения и профиля дискового шлифовального круга при затыловании боковых поверхностей зубьев, которая позволяет получить не менее 4-х точек контакта шлифовального круга и шлифуемой поверхности в осевом сечении фрезы и, таким образом, минимизировать органическую погрешность шлифования при профилировании шлифовального круга, максимально приближенным к профилю исходного контура.

4. Определено, что минимальный задний угол зубьев фрезы имеет место вблизи делительного цилиндра фрезы, и угол ϕ_c установки затыловочного суппорта шлифовально-затыловочного станка необходимо рассчитывать, исходя из минимальной величины заднего угла 4° .

5. Выявлено, что при затыловании *правой и левой сторон* зубьев величину угла ϕ_0 установки оси шлифовального суппорта предпочтительно назначать 18° и уточнять из условия неподрезания противоположной стороны производящей поверхности режущих кромок зубьев.

6. При затыловании *левой стороны* зубьев правозаходной фрезы направления углов подъема шлифуемой поверхности и винтовой поверхности режущих кромок имеют разные знаки. Соответственно, и угол наклона β_n оси шлифовального круга к горизонту также может иметь знак, противоположный углу подъема производящей поверхности фрезы.

7. Приведенная методика предлагается к использованию также при разработке управляющих программ наладки шлифовально-затыловочного станка и механизма правки шлифовального круга при обработке червячных фрез на затыловочных станках с числовым программным управлением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сандлер, А.И., Лагутин, С. А., Верховский, А.В. Производство червячных передач / под общей ред. С.А. Лагутина. – М.: Машиностроение, 2008. – 272 с.
2. Сандлер, А.И., Лагутин, С.А., Гудов, Е.А. Теория и практика производства червячных передач общего вида

(учеб.-практ. посо.) / под общей ред. С.А. Лагутина. – Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. – 346 с.

3. A.I. Sandler and S.A. Lagutin Relieving the teeth of hobs for cutting the Wildhaber-Novikov gears. The 10th International Conference KOD 2018 “Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering”, 6 – 8 June 2018, Novi Sad, Serbia / Published under licence by IOP Publishing Ltd. / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 393, conference 1; <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/393/1/012068/meta>.

4. Короткин, В.И., Онишков, Н.П., Харитонов, Ю.Д. Зубчатые передачи Новикова. Достижения и развитие. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 384 с.

5. Стеблецов, Ю.Н., Тарапанов, А.С. Износостойкость режущего инструмента при обработке зубчатых колес передачи Новикова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2011. – №4/3. – С. 83-86

REFERENCES

1. Sandler, A.I., Lagutin, S.A., Verkhovsky, A.V. *Worm Gear Production* / under the general editorship of S.A. Lagutin. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 272.
2. Sandler, A.I., Lagutin, S.A., Gudov, E.A. *Theory and Practice of General Worm Gear Manufacturing* (educational-pract. Manual) / under the general editorship of S.A. Lagutin. – Moscow-Vologda: Infra-Engineering, 2016. – pp. 346.
3. A.I. Sandler and S.A. Lagutin Relieving the teeth of hobs for cutting the Wildhaber-Novikov gears. The 10th International Conference KOD 2018 “Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering”, 6 – 8 June 2018, Novi Sad, Serbia / Published under licence by IOP Publishing Ltd. / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 393, conference 1; <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/393/1/012068/meta>
4. Korotkin, V.I., Onishkov, N.P., Kharitonov, Yu.D. *Novikov Gearing. Achievements and Development*. – M.: Mechanical Engineering-1, 2007. – pp. 384.
5. Stebletsov, Yu.N., Tarapanov, A.S. Wear-resistance of cutting tool at Novikov gearing cog-wheels machining // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – Orel: State university – ESPC, 2011. – No.4/3. – pp. 83-86.

Рецензент д.т.н. Е.С. Трубацев

