

Научно-производственная статья
УДК 621.833, 621.914.6
doi:10.30987/2223-4608-2022-1-37-48

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2022. №1 (127). С. 37-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №1 (127). P. 37-48.

Функционально-ориентированная технология затылования зубьев зуборезных червячных фрез нового стандарта

Александр Исерович Сандлер, к.т.н.
ООО «СЭЛЭКШЕН», г. Москва, Россия,
sandli@aha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2197-0447>

Аннотация. Приведены результаты научного исследования производственной технологии, направленной на выявление предсказуемых погрешностей и обеспечение требуемого качества обработки.

Ключевые слова: червячная фреза, затылование, затылованная поверхность зубьев, зубчатые колеса, шлифование, шлифовальный круг

Для цитирования: Сандлер А.И. Функционально-ориентированная технология затылования зубьев зуборезных червячных фрез нового стандарта // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №1(127). – С. 37-48.
doi:10.30987/2223-4608-2022-1-37-48.

Scientific and production article

Functionally-oriented technology for backing-off of new standard gear-cutting hobs

Alexander I. Sandler, Cand. Sc. Engineering
LLC "SELECTION", Moscow, Russia

Annotation. The results of scientific research of production technology aimed at identifying predictable errors and ensuring the required quality of processing are presented.

Keywords: gear-cutting hob, teeth relief, gear components, grinding operation, cylindrical grinding stone

For citation: Sandler A.I. Functionally-oriented technology for backing-off of new standard gear-cutting hobs. / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, No.1(127). pp. 37-48. doi:10.30987/2223-4608-2022-1-37-48.

Введение

С 2017 г. взамен ранее действовавшего ГОСТ 9324-80 «Фрезы червячные чистовые однозаходные для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем. Технические условия», введен в действие новый международный стандарт ГОСТ 9324-2015 «Фрезы червячные цельные чистовые для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем. Технические условия», согласованный с зарубежными стандартами ISO 2490:2007 – по типоразмерам фрез и ISO 4468:2009 – по

требованиям к точности их изготовления. В его название введен термин «цельные», указывающий, что он не распространяется на сборные фрезы. Таким образом, при изготовлении сборных червячных фрез – тип 3 по ГОСТ 9324-80, последний продолжает действовать для изготовителей.

Основные отличия нового стандарта, влияющие на формообразование профиля производящей рейки, состоят в том, что изменен размерный ряд наружных диаметров фрез, изменены требования к точности изготовления

фрез, в частности, введен класс точности 4А, введены параметры исполнения многозаходных фрез. Рекомендации по параметрам затылования ограничены указанием величины заднего угла на наружном цилиндре $9...12^\circ$.

Сочетание параметров червячных фрез (модуль, наружный и делительный диаметры, число стружечных канавок, спад затылка на наружном цилиндре) влияет на решение двух основных задач функционально-ориентированной технологии затылования зубьев при изготовлении. Во-первых, как показала практика эксплуатации червячных фрез, в том числе выполненных по стандарту ГОСТ 9324-80, нормальный задний угол зубьев на профиле режущей кромки должен быть обеспечен не менее 4° [1]. Во-вторых, погрешность профиля шлифуемой поверхности зубьев должна быть минимизирована в пределах установленного допуска на профиль зуба. Отклонение от прямолинейности профиля производящей рейки вносит не менее 80 % погрешности профиля зуба нарезаемого колеса [8].

Ввод в действие нового стандарта на типоразмеры и параметры точности профиля указывает на необходимость дополнения и уточнения функционально-ориентированной технологии затылования зубьев. Прежде всего, необходима разработка методики расчета ряда конструктивных элементов зубьев фрезы, в том числе: спада затылка на угловом шаге зубьев, с учетом заданных размеров фрез и значений заднего угла у боковых режущих кромок и на наружном цилиндре фрезы; делительного диаметра производящей поверхности фрезы; величины хода стружечной канавки (винтовой передней поверхности зубьев).

Целью данной работы является оптимизация процесса шлифования боковых затылованных поверхностей зубьев, на основе оценки органической погрешности профиля производящей рейки и методов ее компенсации для достижения необходимой точности.

Теоретически профиль производящей рейки для нарезания эвольвентных колес должен быть прямолинейным, соответственно, боковые затылованные поверхности зубьев фрезы должны иметь также прямолинейный осевой профиль, т.е. теоретически представлять собой архимедовы винтовые поверхности. Однако такие поверхности могут быть образованы только резцом с прямолинейной режущей кромкой в осевой плоскости обрабатываемой поверхности, а при шлифовании дисковым шлифовальным кругом они могут быть только

приближены к архимедовым с отклонением от прямолинейности осевого профиля. Величина этого отклонения зависит от профиля круга и параметров его установки на станке [2 – 7].

В фундаментальной монографии Ф.Л. Литвина (Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. М.: Наука, 1968. – 584 с.) показано, что дисковым шлифовальным кругом с угловым прямолинейным профилем при параллельных осях изделия (витка червяка) и круга образуется теоретически точная эвольвентная винтовая поверхность. Угол осевого профиля круга при этом должен быть равен углу подъема винтовой поверхности на ее основном цилиндре. Линия контакта шлифующей и шлифуемой поверхностей находится в осевом сечении круга и проходит касательно к основному цилиндру шлифуемой поверхности (рис. 1). При этом профиль шлифуемой винтовой поверхности в любом сечении, касательном к основному цилиндру, остается прямым независимо от диаметра круга. Создавая при затыловании именно такие поверхности, получаем постоянство прямолинейного профиля зуба фрезы в сечении, касательном к ее основному цилиндру, на всем протяжении рабочего хода затылования, и также постоянство профиля осевого сечения затылованной поверхности и режущих кромок зубьев независимо от числа переточек фрезы [1].

Параметры производящей поверхности и зубьев червячных фрез

Производящей поверхностью фрезы является та винтовая поверхность, на которой расположены режущие кромки зубьев фрезы, образованные пересечением передней винтовой поверхности и боковых затылованных поверхностей. Затылованная поверхность боковой стороны зубьев фрезы представляет собой аналог винтовой поверхности с углом подъема, увеличенным для одной и уменьшенным для другой стороны зуба, относительно угла подъема производящей поверхности фрезы. Основные параметры производящей поверхности фрезы, регламентированные стандартом, задаются в нормальном сечении, совпадающим с производящей рейкой нарезаемого колеса.

К параметрам производящей рейки относятся: модуль m_0 ; угол профиля $\alpha_0 = 20^\circ$; высота головки зубьев $h_0 = 1,25m_0$ и радиусы закругления головки и впадины зубьев. Стандарт также регламентирует наружный диаметр

фрезы d_{a0} и число z_0 стружечных канавок (число зубьев в торцевом сечении). Остальные параметры фрезы, в том числе такие важные как: делительный диаметр d_{m0} ; величина K спада затылка зуба на угловом шаге зубьев;

угол γ_{m0} подъема витка производящей поверхности на делительном цилиндре; угол λ_{m0} наклона стружечных канавок на том же цилиндре; ход P_z винтовой стружечной канавки являются расчетными.

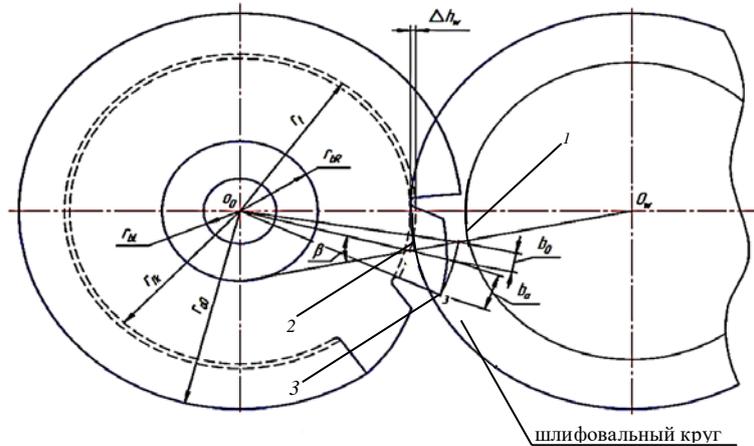


Рис. 1. Затылование зубьев с эвольвентной боковой поверхностью

Расчет делительного диаметра d_{m0} новой фрезы производят по формуле:

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

В рекомендуемом Приложении А разработки стандарта для последующего расчета хода P_z стружечной канавки (винтовой передней поверхности зубьев) приняли $h_0 = 1,3m_0$. Однако вследствие периодических заточек фрезы по передней поверхности наружный диаметр d_{a0} уменьшается более чем на $0,1m_0$, и, соответственно, уменьшается делительный диаметр d_{m0} .

Этот параметр следует уточнять, исходя из среднего диаметра шлифованной части зуба фрезы, которая, в соответствии с требованиями стандарта, имеет свои ограничения. Угол γ_{m0} подъема витка производящей поверхности на делительном цилиндре фрезы определяем из соотношения:

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

где Z – число заходов производящей поверхности.

Угол λ_{m0} наклона винтовой передней поверхности на делительном цилиндре принимают равным углу γ_{m0} подъема витка на делительном цилиндре фрезы, и величину хода P_z винтовой стружечной канавки определяют по выражению:

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

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

$$\operatorname{tg} \alpha_{0x} = \operatorname{tg} \alpha_0 / \cos \gamma_{m0}. \quad (4)$$

После этого можно определить осевые углы α_{xR0} и α_{xL0} профилей обеих (правой и левой) затылованных поверхностей зубьев фрезы при винтовой форме передней поверхности зубьев.

В серийном производстве червячных фрез, как в отечественной инструментальной промышленности, так и за рубежом, утвердился метод радиального затылования, при котором вектор движения затылования направлен перпендикулярно оси фрезы.

При винтовых стружечных канавках (и соответственно винтовых передних поверхностях зубьев) осевые углы α_{xR0} и α_{xL0} профилей затылованных поверхностей зубьев отличаются от осевого угла α_{0x} профиля производящей поверхности. Для однозаходных фрез малых и средних модулей (до 3,5 мм) можно использовать классические формулы расчета этих углов (индексы R и L здесь и далее относятся, соответственно, к правой и левой сторонам зубьев):

– для правозаходных фрез:

$$\operatorname{ctg} \alpha_{xR0} = \operatorname{ctg} \alpha_{0x} - Kz_0/P_z; \quad \operatorname{ctg} \alpha_{xL0} = \operatorname{ctg} \alpha_{0x} + Kz_0/P_z. \quad (5)$$

– для левозаходных – знаки перед вторым слагаемым меняются на противоположные.

Однако для более крупномодульных однозаходных прецизионных фрез класса точности

4А...А, а также для всех типоразмеров многозаходных фрез, точности этих формул недостаточно, поскольку погрешность расчета по формуле (5) вносит угловую погрешность профиля, возрастающую с увеличением модуля и числа заходов производящей поверхности, и ее влияние соизмеримо с заданной стандартом допустимой линейной погрешностью профиля зуба фрезы [1 – 3]. Так, для мо-

дуля 10 погрешность угла профиля в 1' соответствует линейной погрешности профиля более 6 мкм, что превышает полную величину допуска на этот параметр по классу точности 4А и соизмеримо с требованиями по классам точности 3А...А. В этой связи следует воспользоваться более четкими формулами расчета этих углов:

$$\alpha_{xR0} = \alpha_{0x} + 57,296k \sin^2 \alpha_{0x} / [P + p + ktg \alpha_{0x}]; \alpha_{xL0} = \alpha_{0x} - 57,296k \sin^2 \alpha_{0x} / [P + p - ktg \alpha_{0x}], \quad (6)$$

где $P = P_z/2\pi$ – винтовой параметр передней поверхности; $p = 0,5m_0Z/\cos\gamma_{m0}$ – винтовой параметр производящей поверхности фрезы; $k = Kz_0/2\pi$ – параметр затылования; 57,296 – коэффициент перехода от радианной к градусной величине угловой поправки.

Таким образом, для правозаходной червячной фрезы осевой угол α_{xR0} профиля правой стороны зубьев больше осевого угла α_{0x} профиля производящей поверхности, угол α_{xL0} профиля левой стороны зубьев меньше угла α_{0x} . Для левозаходных фрез – обратный порядок: $\alpha_{xL0} > \alpha_{0x} > \alpha_{xR0}$.

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

$tg\gamma_R = (p + ktg\alpha_{xR0})/r_{m0}$; $tg\gamma_L = (p - ktg\alpha_{xL0})/r_{m0}$, (7)
где $r_{m0} = d_{m0}/2$ – радиус делительного цилиндра фрезы.

Для левозаходных фрез индексы R,L в фор-

муле (7) меняются местами.

Как видно из формул (5)–(7), геометрия затылованных поверхностей – углов профиля и подъема зависит от величины K спада затылка на угловом шаге зубьев фрезы (в ее поперечном сечении) и параметра затылования k . Эти величины определяем из следующего условия: минимальный задний угол около режущей кромки зуба должен быть не менее 4° . Такой точкой является стык прямолинейного участка режущей кромки и радиусного участка на голвке зуба, в которой радиус r_{a1} фрезы равен:

$$r_{a1} = 0,5d_{a0} - 0,25m_0 \quad (8)$$

и указанное выше условие, с достаточной для практики точностью, определяем формулой:

$$k = r_{a1}tg4^\circ/\sin20^\circ. \quad (9)$$

Отсюда получаем величину K спада:

$$K = 2\pi k/z_0. \quad (10)$$

В табл. 1 приведены расчетные значения спада K затылка для фрез исполнений 1 и 2.

1. Величины спада затылка зуба на угловом шаге фрезы (округление до 0,1 мм)

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

Рассчитанные по формулам (8)–(10) параметры затылования по типоразмерам фрез исполнений 1 и 2 обеспечивают получение заднего угла у режущих кромок на вершинах зубьев в пределах $11,0...11,5^\circ$, что соответству-

ет требованиям стандарта (п. 3.1.5).

Как видно из таблицы, при малых модулях значения спада K затылка превышают величину модуля m_0 в 2 – 3 раза, что затрудняет наладку затыловочного станка, вынуждая для

исключения подрезания зуба, следующего за обрабатываемым, применять шлифовальные круги малых диаметров, особенно при затыловании режущих кромок на наружном цилиндре.

Величину K можно ощутимо уменьшить применением радиально-осевого затылования [2 – 4], при котором направление движения затыловочного суппорта станка отклоняется

$$\operatorname{tg}9^\circ = k_{ra} \cos \varphi_c / (0,5d_{a0}) \text{ или } k_{ra} = 0,5d_{a0} \operatorname{tg}9^\circ / \cos \varphi_c, \quad (11)$$

индекс ra введен для отличия параметров радиально-осевого затылования от параметров радиального (без индексов).

С другой стороны, для боковых режущих кромок, условие обеспечения заднего угла не менее 4° описываем зависимостью:

$$k_{ra} = r_{a1} \operatorname{tg}4^\circ / \sin(20^\circ + \varphi_c). \quad (12)$$

Приравнивая величины k_{ra} из (11), (12) после математических преобразований и раскрытия значений функций известных углов, получим значение угла φ_c :

$$\varphi_c = \operatorname{arctg}(0,106 - 0,235m_0 / d_{a0}) \quad (13)$$

$$\operatorname{tg}\gamma_R = [p + k_{ra} \sin(\alpha_{xR0} + \varphi_c) / \cos \alpha_{xR0}] / r_{m0}; \quad \operatorname{tg}\gamma_L = [p - k_{ra} \sin(\alpha_{xL0} + \varphi_c) / \cos \alpha_{xL0}] / r_{m0}. \quad (15)$$

Значения углов $\gamma_{R,L}$, определяемые формулами (7) и (15), для каждой из сторон практически одинаковы, поскольку рассчитаны из одних условий обеспечения боковых задних углов.

Радиально-осевое затылование применяют также при обработке зубьев крупномодульных фрез, в случае если расчетная величина спада K превышает технические возможности затыловочного станка.

Определение делительного диаметра червячной фрезы

Делительный диаметр d_{m0} червячной фрезы рассчитывают с учетом уменьшения наружного диаметра фрезы вследствие ее переточек для обновления режущих свойств. Как указа-

от перпендикуляра к оси фрезы в сторону увеличения угла между этим направлением и затылуемой поверхностью на некоторый угол φ_c . Величину угла φ_c определяем из следующих соображений. Задаваясь минимальной величиной заднего угла на вершинах зубьев (ограниченной стандартом) 9° , запишем условие получения этой величины в виде:

и, зная φ_c , по формуле (11) определяем величину k_{ra} и, с учетом (10), величину K_{ra} :

$$K_{ra} = \pi d_{a0} \operatorname{tg}9^\circ / (z_0 \cos \varphi_c) \approx 0,5d_{a0} / z_0. \quad (14)$$

Анализ расчетных параметров радиально-осевого затылования φ_c и K_{ra} показал, что по сравнению с радиальным затылованием величину K_{ra} для фрез малых и средних модулей можно уменьшить относительно K на 20...23 %, при этом φ_c не превышает 6° .

При радиально-осевом затыловании углы $\gamma_{R,L}$ подъема затылованных поверхностей зубьев на делительном цилиндре правозаходной фрезы определяем выражениями:

но выше, в первую очередь, на это влияет протяженность шлифованной части зубьев, которая обеспечивает требуемую точность профиля при переточках фрезы и является одним из ограничительных параметров в ГОСТ 9324-2015. Её протяженность, считая по окружности вершин зубьев, должна быть не менее $1/2$ длины зуба для фрез модулей до 4 мм; и не менее $1/3$ длины зуба для фрез модулей свыше 4 мм.

Считая, что толщина зуба и ширина впадины стружечной канавки по наружному диаметру должны быть примерно равны [1], определим минимально необходимую длину b_a шлифованной части зубьев на наружном цилиндре фрезы радиуса r_{a0} и охватывающий эту часть зуба центральный угол φ_{a1} в виде:

$$b_a = \pi d_{a0} / 4z_0 = \pi r_{a0} / 2z_0, \quad \varphi_{a1} = \pi / 2z_0 - \text{ для фрез модулем } \leq 4 \text{ мм}, \quad (16)$$

$$b_a = \pi d_{a0} / 6z_0 = \pi r_{a0} / 3z_0, \quad \varphi_{a1} = \pi / 3z_0 - \text{ для больших модулей}. \quad (17)$$

Уменьшение наружного диаметра фрезы при затыловании составляет $2k\varphi_{a1}$. Отсюда уточним используемое в формулах (2) – (7) для расчета параметров производящей по-

верхности фрезы значение ее делительного диаметра, как среднее для новой и полностью переточенной фрезы:

$$d_{m0} = d_{a0} - 2,5m_0 - k\varphi_{a1}. \quad (18)$$

Определение рабочего хода затылования шлифовальным кругом

Для обеспечения сохранности профиля при переточках шлифованная часть зуба должна иметь соответствующую протяженность на ножке зуба. Поскольку вершина зуба и крайняя точка профиля на ножке зуба вступают в обработку не одновременно, то имеет место некоторый участок врезания. Таким образом, центральный угол поворота фрезы во время рабочего хода затылования должен охватывать и минимально необходимую длину b_a шлифованной части зуба на головке, и шлифованную часть на участке b_0 врезания, после которого начинается шлифование боковой поверхности зуба на полную высоту профиля.

Общая длина b дуги шлифованной части зуба, считая по окружности вершин, составит:

$$b = b_0 + b_a. \quad (19)$$

Положение линии контакта шлифовального круга с шлифуемой поверхностью зуба отно-

сительно межосевого перпендикуляра осей фрезы и круга и, соответственно, участка b_0 врезания зависит от угла установки оси круга, однако длина линии контакта шлифуемой и шлифующей поверхности от угла установки оси круга зависит незначительно только в пределах, определяемых изменением кривизны и локального угла профиля круга, связанных с приближением профиля шлифуемой поверхности к заданной прямой.

Поэтому, для упрощения расчета, рассмотрим эту задачу применительно к затылованию эвольвентных боковых поверхностей зубьев фрезы [1], когда оси шлифовального круга O_w и фрезы O_0 параллельны. Определим b_0 следующим образом (см. рис. 1).

Линия контакта шлифующей и шлифуемой поверхностей проходит через ось круга касательно к основному цилиндру радиуса r_b шлифуемой поверхности. Радиусы r_b основных цилиндров для правой и левой боковых сторон зубьев определяются формулами из [1, 2]:

$$r_{bR} = (p + ktg\alpha_{xR0}) / (tg^2\alpha_{xR0} + tg^2\gamma_R)^{0,5}; \quad r_{bL} = (p - ktg\alpha_{xL0}) / (tg^2\alpha_{xL0} + tg^2\gamma_L)^{0,5}. \quad (20)$$

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 выражений:

$$tg\alpha_{bR} = tg\gamma_{bR} = tg\alpha_{wR} = (tg^2\alpha_{xR0} + tg^2\gamma_R)^{0,5}; \\ tg\alpha_{bL} = tg\gamma_{bL} = tg\alpha_{wL} = (tg^2\alpha_{xL0} + tg^2\gamma_L)^{0,5}. \quad (21)$$

Угол β_f пересечения касательной к основному цилиндру и радиальной прямой в точке 2 начала шлифования полного профиля зуба (ножка зуба) определяется выражением:

$$\sin\beta_f = r_b / (r_{a0} - 2,5m_0), \quad (22)$$

на головке зуба в точке 1 аналогичный угол определяется как:

$$\sin\beta_a = r_b / r_{a0}, \quad (23)$$

а длину b_0 участка врезания вычисляем по формуле:

$$b_0 = r_{a0}(\beta_f - \beta_a) \approx r_b 2,5m_0 / (r_{a0} - 2,5m_0). \quad (24)$$

Общий угол φ_a поворота фрезы за рабочий ход затылования:

$$\varphi_a = (b_0 + b_a) / r_{a0}, \quad (25)$$

а спад K_a затылка на рабочем участке и, соответственно, рабочий ход затылования составит:

$$K_a = k\varphi_a. \quad (26)$$

Общая длина дуги шлифования зуба и рабочего хода зависит от радиуса r_b основного цилиндра: чем больше r_b , тем больше должны

быть участок врезания, длина дуги шлифования и рабочий ход затылования, чтобы обеспечить требуемую длину шлифованной части зуба для переточек 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 зубьев.

Исключение недопрофилирования затылованных поверхностей

Шлифуемая поверхность может оказаться спрофилирована не на полную высоту зуба (витка) из-за того, что шлифовальный круг недостаточно углублен во впадину. Как правило, это имеет место, если линия контакта находится в стороне от межосевого перпендикуляра круга и фрезы. Наиболее наглядно это при шлифовании эвольвентных винтовых поверхностей с параллельными осями круга и фрезы (червяка), когда линия контакта между поверхностью круга и шлифуемой поверхностью проходит по касательной к основному цилиндру радиуса r_b , пересекая ось шлифовального круга (см. рис. 1). Для того чтобы исключить не допрофилирование ножки зуба на межосевом перпендикуляре круга и изделия требуется дополнительно заглубить круг

во впадину между витками, занизив дно впадины на величину Δh_w , определяемую по формуле [1, 2]:

$$\Delta h_w = [r_f - (r_f^2 - r_b^2)^{0,5}] / (1 + r_f/r_w), \quad (27)$$

где $r_f = r_{fк}$ – минимальный радиус активного профиля шлифуемой поверхности; r_w – максимальный радиус шлифовального круга.

Минимальный шлифуемый радиус $r_{fк}$ боковой поверхности определяют в конце рабочего хода затылования. С учетом длины рабочего хода K_a он составит:

$$r_{fк} = r_{a0} - 2,5m_0 - K_a. \quad (28)$$

Величина Δh_w для двух сторон зубьев фрезы разная, так как зависит от радиуса r_b основного цилиндра затылованной поверхности. Наибольшие из значений r_b , K_a и, соответственно, $r_{fк}$ у правозаходных фрез для правой стороны зубьев при значении $K_a = K_{aR}$ из формулы (26). Выполнять указанное занижение рекомендуем кольцевой канавкой на всю ширину впадины.

Опасность недопрофилирования сводится к минимуму в случае, если линия контакта круга и зуба фрезы пересекает межосевой перпендикуляр на делительном цилиндре или на цилиндре впадин, как это рекомендовано [2, 3] при затыловании червячных фрез для червячных колес. В этом случае и необходимое заглабление Δh_w является минимальным.

Весьма распространена на практике установка оси круга на угол, равный углу подъема производящей поверхности. В этом случае линия контакта поверхностей круга и зуба фрезы также находится в стороне от межосевого перпендикуляра и требует занижения на величину Δh_w , весьма близкую к ее значению по формуле (27).

Исключение подрезания шлифуемых поверхностей зубьев фрезы

В процессе обработки рабочий ход затылования каждого зуба заканчивается отскоком затыловочного суппорта, после которого начинается новый рабочий ход. Подрезание шлифуемых поверхностей происходит в случае, если наружный диаметр шлифовального круга или его боковая поверхность врезаются в режущую кромку следующего зуба. На практике отсутствие подрезания обеспечивается подбором соответствующего диаметра шлифовального круга и регулировкой длины рабочего хода затылования.

При затыловании эвольвентных боковых поверхностей зубьев (при параллельных осях

фрезы и круга) осевой угол профиля круга больше угла профиля этих поверхностей, как в осевом, так и в нормальном сечениях, поэтому поверхность круга может коснуться режущей кромки зуба, следующего за обрабатываемым, только на его боковой поверхности у вершины. Затылование боковых поверхностей зубьев выполняется до обработки радиусных закруглений головок зубьев. Рассмотрим взаимное расположение поверхности круга и затылуемой боковой поверхности в момент непосредственно после рабочего хода шлифования зуба длиной b (26) перед отскоком затыловочного суппорта (рис. 2). Смещение Δ_0 режущей кромки зуба, следующего после обрабатываемого, относительно линии контакта поверхностей круга и зуба в проекции на ось шлифуемого изделия определим как:

$$\Delta_0 = (2\pi p/z_0) - (p \pm ktg\alpha_w)\varphi_a. \quad (29)$$

Для правозаходных фрез верхний знак (+) во втором слагаемом (29) относится к правой стороне правозаходной фрезы, нижний (–) – к левой. Следовательно для правозаходных фрез смещение Δ_{0L} для левой стороны зубьев больше, чем для правой. Заметим, что подрезание для правой стороны зубьев исключено технологически, так как между рабочей поверхностью круга и режущей кромкой зуба, следующего за обрабатываемым, имеется гарантированный зазор. Поэтому условие отсутствия подрезания достаточно определять только для левой стороны зубьев правозаходной фрезы (или для правой стороны у левозаходной).

Примем точку B_1 на пересечении боковой и наружной затылованных поверхностей зуба фрезы последней точкой контакта при повороте фрезы на угол φ_a и, соответственно, рабочего хода затылования (перед отскоком затыловочного суппорта).

Расстояние y_0 , от точки B_1 до вершины следующего зуба, в проекции на перпендикуляр к оси изделия, с достаточной точностью для практических расчетов, определим как:

$$y_{0L} = r_{a0} (2\pi/z_0 - \varphi_a) \quad (30)$$

В системе координат $Ox_p Y_p$ (рис. 2) ось X_p проходит через точку B_1 , боковой затылованной поверхности зуба, точка O – центр кривизны поверхности шлифовального круга в плоскости, параллельной оси фрезы; ось Y_p – параллельна касательной к затылованной поверхности зуба в точке B_1 . Угол между осью X_p и проекцией оси $O-O$ круга в той же плоскости равен углу γ_{LKa} подъема затылуемой по-

верхности в точке B_1 на цилиндре фрезы радиусом $(r_{a0} - K_a)$:

$$\operatorname{tg}\gamma_{LKa} = (p - k \operatorname{tg}\alpha_{xL0}) / (r_{a0} - K_a). \quad (31)$$

При параллельных осях шлифуемой поверхности и шлифовального круга радиус ρ_w кривизны сечения поверхности круга в рассматриваемой плоскости определяется, с одной стороны, в зависимости от радиуса r_{wB} круга в точке B_1 и угла профиля α_w круга по формуле:

$$\rho_w = r_{wB} / \operatorname{tg}\alpha_w. \quad (32)$$

С другой стороны, в координатах $Ox_p Y_p$ он определяется параболической зависимостью:

$$\rho_w = y_p^2 / 2\Delta_w, \quad (33)$$

где y_p – расстояние от оси X_p до режущей кромки следующего зуба:

$$y_p = (y_{0L} + \Delta_{0L} \operatorname{tg}\gamma_{LKa}) \cos\gamma_{LKa}, \quad (34)$$

а Δ_w – стрелка выпуклости сечения шлифовального круга плоскостью $Ox_p Y_p$:

$$\Delta_w = \Delta_{0L} / \cos\gamma_{LKa} - y_p \operatorname{tg}\gamma_{LKa}. \quad (35)$$

В формулах (34) и (35) необходимо учитывать знак γ_{LKa} , получаемый из (35).

С учетом (32) и (33) условие исключения подрезания при параллельных осях фрезы и круга определяем, как:

$$r_{wB} = y_p^2 \operatorname{tg}\alpha_w / 2\Delta_w, \quad (36)$$

и, соответственно, максимально допустимый диаметр d_w шлифовального круга:

$$d_w < 2r_{wB} + 5m_0. \quad (37)$$

В табл. 2 приведены результаты расчета диаметров d_w шлифовальных кругов для затылования червячных фрез исполнения 2 с модулями от 2 до 16 мм.

2. Параметры затылования, определяющие максимально допустимый диаметр шлифовального круга

m_0 , мм	d_{a0} , мм	p , мм	z_0	k , мм	α_{wL} , °	b , мм	γ_{LKa} , °	Δ_{0L} , мм	y_{0L} , мм	y_p , мм	Δ_w , мм	r_{wB} , мм	d_w , мм
2	65	1,00	14	6,685	20,098	4,4	-2,586	0,644	10,216	10,176	1,104	17,176	44
2,5	70	1,251	14	6,907	20,062	4,7	-2,112	0,732	11,018	10,984	1,138	19,365	51
3,0	75	1,501	14	7,576	20,047	5,1	-1,960	0,845	11,759	11,723	1,247	20,112	55
3,5	80	1,752	14	8,021	20,022	5,4	-1,706	0,954	12,552	12,518	1,318	21,668	60
4	85	2,003	14	8,467	20,002	5,7	-1,480	1,043	13,396	13,364	1,388	23,406	66
5	95	2,505	14	9,358	19,973	4,43	-1,093	1,208	16,886	16,860	1,530	33,762	92
6	105	3,007	12	10,504	19,957	5,47	-0,894	1,658	22,021	21,993	2,002	43,87	103
8	120	4,013	10	11,937	19,930	6,72	-0,307	2,559	30,538	30,524	2,723	62,042	164
10	130	5,024	10	12,732	19,928	7,51	0,369	3,110	33,327	33,346	2,895	69,63	189
12	160	6,026	9	15,756	19,929	9,83	0,230	4,168	46,021	46,037	3,983	96,469	252
16	200	8,042	9	20,054	19,925	13,1	0,456	5,513	56,750	56,792	5,060	115,51	311

Достаточно большие допустимые размеры диаметра d_w шлифовального круга при модулях 12 мм и более (практически до 25 мм) позволяют проектировать эти фрезы с максимальным (рекомендованным стандартом) чис-

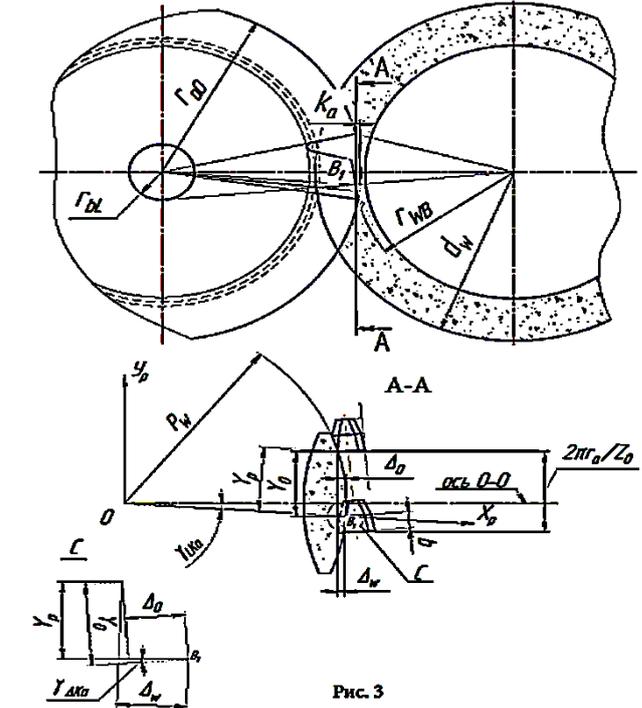


Рис. 2. Исключение подрезания поверхности зуба фрезы, следующего за обрабатываемым зубом

Из полученных результатов, следует, что при такой установке для исключения подрезания диаметр шлифовального круга необходимо ограничивать при модулях до 6 мм. Фрезы модулем 8 мм без опасности подрезания можно затыловать на станках с максимальным диаметром круга до 160 мм. Фрезы модулем 10 мм и более можно обрабатывать без опасности подрезания на станках с максимальным размером круга 175 мм (например, мод. МВ-107).

лом стружечных канавок 10.

Отметим также важность размера $2(r_{wB} - K_a)$. Диаметры гильзы шпинделя шлифовального круга и планшайбы, посредством которой шлифовальный круг устанавливаются на

шпинделе, должны быть меньше этого размера.

Оптимизация наладки затыловочного станка

Обратим внимание на расчетные данные для фрез малых и средних модулей до 6 мм, при обработке которых на параллельных осях круга и фрезы вследствие условий (33) и (34), необходимо существенно ограничивать диаметр шлифовального круга.

На затыловочных станках, в отличие от червячно- и резьбо-шлифовальных, шлифовальную бабку можно устанавливать с поворотом вокруг вертикальной оси на угол φ_0 , задаваемый оператором при наладке станка [1 – 3]. Повернем шлифовальную бабку на угол φ_0 в сторону увеличения угла профиля шлифовального круга, чтобы общий угол профиля шлифовального круга составил величину $(\varphi_0 + \alpha_{wL})$ (рис. 3). Ось круга остается в одной плоскости с осью шлифуемой поверхности фрезы, но расположена к последней под углом φ_0 . В этом случае условие получения эвольвентной затылованной поверхности не нарушается.

Радиус кривизны ρ_w определим по формуле:
$$\rho_w = r_{wB} \cos \alpha_w / \sin(\alpha_w + \varphi_0). \quad (38)$$

Величину угла φ_0 ограничивает значение угла профиля производящей поверхности фрезы, однако, с достаточной степенью приближения можно принять это ограничение рав-

ным углу α_0 профиля производящей рейки фрезы.

$$\varphi_0 \leq \alpha_0 = 20^\circ \quad (39)$$

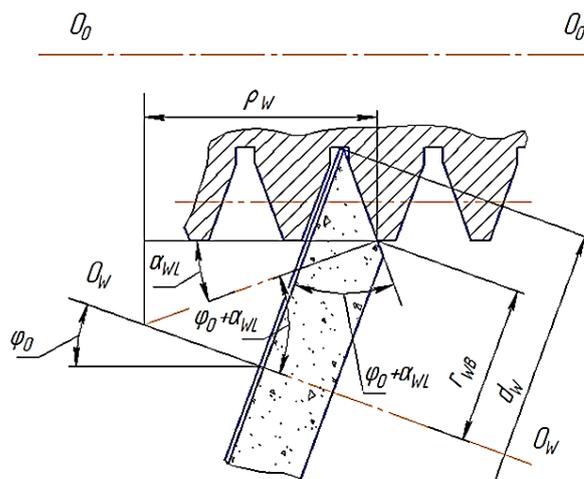


Рис. 3. Поворот оси шлифовального круга на угол φ_0 для увеличения кривизны поверхности шлифовального круга

С учетом (38), значение минимального радиуса рабочей поверхности шлифовального круга при затыловании определяем выражением:

$$r_{wB} = y_p^2 \sin(\alpha_w + \varphi_0) / (2\Delta_w \cos \alpha_w). \quad (40)$$

В табл. 3 приведены расчетные данные допустимых размеров шлифовального круга r_{wB} и d_w при $\varphi_0 = 20^\circ$ для операции затыловании фрез малых и средних модулей.

3. Расчет допустимых размеров r_{wB} и d_w шлифовальных кругов при $\varphi_0 = 20^\circ$ для фрез малых и средних модулей – левая сторона зубьев правозаходных фрез

m_0 , мм	d_{a0} , мм	p , мм	z_0	k , мм	α_{wL} , °	b , мм	$\gamma_{LK\alpha}$, °	Δ_{0L} , мм	y_{0L} , мм	y_p , мм	Δ_w , мм	r_{wB} , мм	d_w , мм
2	65	1,00	14	6,685	20,098	4,4	-2,586	0,644	10,216	10,176	1,104	32,16	74
2,5	70	1,251	14	6,907	20,062	4,7	-2,112	0,732	11,018	10,984	1,138	36,32	85
3,0	75	1,501	14	7,576	20,047	5,1	-1,960	0,845	11,759	11,723	1,247	37,97	90
3,5	80	1,752	14	8,021	20,022	5,4	-1,706	0,954	12,552	12,518	1,318	40,69	98
4	85	2,003	14	8,467	20,002	5,7	-1,480	1,043	13,396	13,364	1,388	44,01	108
5	95	2,505	14	9,358	19,973	4,43	-1,093	1,208	16,886	16,860	1,530	63,50	152
6	105	3,007	12	10,504	19,957	5,47	-0,894	1,658	22,021	21,993	2,002	82,41	194

Целесообразность предложенной оптимизации наладки затыловочного станка очевидна. Во-первых, при обработке фрез модулей до 4 мм, диапазон диаметров применяемого шлифовального круга, от максимального расчетного значения до минимального (в зависимости от модели станка и шлифуемого модуля $d_{w\min} = 50 \dots 60$ мм) достаточен для обработки партии фрез. Во-вторых, исключена зависи-

мость наладки от диаметров гильзы шпинделя и планшайбы шлифовального круга. В-третьих, при обработке зубьев фрез модулей 5 мм и более величину φ_0 можно уменьшить, если максимальный диаметр круга, применяемого на станке, меньше полученного расчетного значения. Задавшись значением d_w , из (37) получаем величину r_{wB} , затем из (40) определяем значение $\sin(\alpha_w + \varphi_0)$, и, соот-

ветственно φ_0 . Так, при размере шлифовального круга $d_w = 120$, для фрез модуля 5 мм величина $\varphi_0 = 8,8^\circ$; для фрез модуля 6 мм $\varphi_0 = 0,6^\circ$. Расчетное значение φ_0 следует округлять в большую сторону до цены деления угла поворота.

Органическая погрешность профиля зубьев фрезы с эвольвентными боковыми поверхностями и ее компенсация

Однако профиль осевого сечения эвольвентной винтовой поверхности не является прямолинейным, и его выпуклость составляет органическую погрешность относительно тре-

буемого прямолинейного профиля затылованной поверхности зуба.

Зная параметры процесса затылования и шлифуемого изделия (формулы (2)–(4), (7), (9), (10), (18), (20), (21)), можно определить органические погрешности – отклонения f_0 от прямолинейности – осевых профилей эвольвентных затылуемых поверхностей зубьев и также отклонения f_n – стрелки выпуклости – режущих кромок зубьев фрезы.

Кривизна $K_{(r_{m0})}$ осевого профиля эвольвентной затылованной поверхности в расчетной точке на делительном цилиндре определяется выражением (см. [3]):

$$K_{R(r_{m0})} = \operatorname{tg}^2 \gamma_R \cos^3 \alpha_{xR0} / (r_{m0} \operatorname{tg} \alpha_{xR0}); \quad K_{L(r_{m0})} = \operatorname{tg}^2 \gamma_L \cos^3 \alpha_{xL0} / (r_{m0} \operatorname{tg} \alpha_{xL0}). \quad (41)$$

Стрелка выпуклости f_0 – органическая погрешность осевого профиля каждой затылованной поверхности с достаточной для практических расчетов точностью определяется выражением:

$$f_{0R} = m_0^2 K_{R(r_{m0})} / (2 \cos^2 \alpha_{xR0}); \quad f_{0L} = m_0^2 K_{L(r_{m0})} / (2 \cos^2 \alpha_{xL0}). \quad (42)$$

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

$$f_{nR} = f_{0R} \cos \gamma_R / \cos(\gamma_R - \gamma_{m0}); \quad f_{nL} = f_{0L} \cos \gamma_L / \cos(\gamma_{m0} - \gamma_L). \quad (43)$$

Основными параметрами, влияющими на величину органической погрешности профиля режущей кромки зуба, являются: параметр затылования k , модуль m_0 , увеличение числа Z заходов производящей поверхности. Для наиболее употребительных типоразмеров фрез

(табл. 2 стандарта – основные параметры фрез исполнения 2, модули ряда 1) в табл. 4 приведены результаты расчетов органической погрешности затылования боковых поверхностей зубьев однозаходных фрез и их сравнение с численными значениями допусков.

4. Сравнение органических погрешностей затылования с допусками на профили зубьев фрезы

Модуль m_0 , мм	Наружный диаметр фрезы d_{a0} , мм	Спад затылка зубьев K , мм	Число зубьев фрезы в торцевом сечении z_0	Органические погрешности профилей производящей рейки зубьев, мкм		Допуск f_0 и предельное отклонение, мкм, для класса точности						
				f_{nR}	f_{nL}	4A	3A	2A	A	B	C	D
2	65	3,0	14	2,3	0,4	3	4	5	7	15	30	39
2,5	70	3,1	14	3,6	0,4	3	5	7	9	18	37	49
3,0	75	3,4	14	5,7	0,5	3	5	7	9	18	37	49
3,5	80	3,6	14	8,0	0,5	3	5	7	9	18	37	49
4	85	3,8	14	10,5	0,5	4	6	8	11	23	46	61
5	95	4,2	14	17	0,4	4	6	8	11	23	46	61
6	105	5,5	12	25	0,35	4	6	8	11	23	46	61
8	120	7,5	10	49	0,1	5	7	10	14	29	58	76
10	130	8,0	10	88	0,2	5	7	10	14	29	58	76
12	160	11,0	9	92	0,1	6	9	13	18	36	72	95
16	200	14,0	9	161	0,4	6	9	13	18	36	72	95

Сравнивая полученные расчетные значения отклонений f_n с допустимыми отклонениями f_0 профиля (Табл. 8, ГОСТ 9324-2015), а также с допусками f_f на профиль зуба по ГОСТ 1643-81 «Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски», можно судить о необходимости ком-

пенсации органической погрешности эвольвентных затылованных поверхностей зубьев для той или иной степени точности изготовления зубчатых колес.

Как показали расчеты (см. табл. 4), для правой стороны зубьев однозаходных фрез,

где угол подъема затылуемой поверхности больше угла подъема производящей поверхности фрезы, при модуле $m_0 \leq 2,25$ мм органическая погрешность не превышает допуска на профиль зуба по классу точности 4А; для фрез больших модулей классов точности 2А и выше указанная компенсация органической погрешности может потребоваться при m_0 от 3,5 мм. Для противоположной стороны зубьев, для всех типоразмеров однозаходных фрез точность профиля класса 4А обеспечивается с многократным запасом.

Компенсация органической погрешности профиля зубьев фрезы с эвольвентными боковыми поверхностями

Линия контакта поверхностей шлифовального круга и шлифуемой поверхности зуба находится в осевом сечении шлифовального круга, поэтому и компенсацию органической поверхности шлифования, следует производить профилированием круга в его осевом сечении. Кривизну $K_{(w_0)}$ осевого профиля шлифовального круга (выпуклость), которая компенсирует кривизну $K_{(m_0)}$ осевого профиля эвольвентной затылованной поверхности в расчетной точке на делительном цилиндре определяем с использованием формулы Эйлера:

$$K_{(w_0)} = K_{(m_0)} \cos^2 \mu \quad (44)$$

где μ – угол между линией контакта поверхностей зуба и шлифовального круга и осевого сечения фрезы в точке их пересечения на делительной окружности радиуса r_{m_0} .

Из очевидного соотношения:

$$\sin \mu = r_b / r_{m_0}. \quad (45)$$

Радиус кривизны $R_{(w_0)}$ профиля круга в его осевом сечении обратен величине $K_{(w_0)}$. При этом расчетное значение угла α_w профиля круга в точке контакта со шлифуемой поверхностью на делительном цилиндре фрезы должно быть соблюдено в соответствии с формулой (21).

Заключение

1. Разработана функционально-ориентированная технология затылования, включающая: расчет основных параметров фрезы, в том числе: спад затылка на угловом шаге, обеспечивающий необходимый задний угол около режущих кромок зубьев, делительный диаметр фрезы, диаметры основных цилиндров эвольвентных боковых поверхностей зубьев, профильные углы в осевом сечении и

в плоскости, касательной к основному цилиндру. Определены параметры кривизны и органической погрешности профиля получаемой затылованной поверхности в осевом сечении и в плоскости производящей рейки фрезы.

2. Для чистовых однозаходных червячных фрез, предназначенных для нарезания цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем и выполненных в соответствии с техническими условиями по ГОСТ 9324-2015, исследован процесс затылования боковых поверхностей зубьев, как аналогов эвольвентных винтовых поверхностей.

3. Применительно к фрезам наиболее распространенного исполнения 2 получаемые погрешности профиля зуба фрезы сопоставлены с параметрами точности по ГОСТ 9324-2015. 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 противоположной стороны зубьев (правая сторона зуба правозаходной фрезы) - у фрез с модулями до 2,25 мм точность профиля боковых поверхностей зубьев технологически обеспечивается по классу точности фрез 4А. С увеличением модуля органическая погрешность возрастает, однако ее значение следует сопоставлять с требованиями к точности изготовления конкретных зубчатых колес по ГОСТ 1643-81.

4. Приведена методика компенсации органической погрешности осевого профиля эвольвентной поверхности путем правки шлифовального круга по дуге окружности в его осевом сечении. Дан порядок расчета радиуса кривизны осевого сечения шлифовального круга.

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

6. Показано, что для исключения подрезания шлифуемых поверхностей зубьев фрезы при затыловании для ряда модулей необходимо ограничивать диаметр шлифовального круга. Приведен порядок его расчета и для фрез исполнения 2 приведены таблицы расчетных данных. Для малых и средних модулей необ-

ходимо использовать метод наладки затыло-вочного станка с поворотом шлифовальной бабки на угол, увеличивающий общий профильный угол шлифовального круга.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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., Лагутин, С.А., Верховский, А.В. Производство червячных передач / под общ.ред. С. А. Лагутина. – М.: Машиностроение, 2008, – 272 с.
3. 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.
4. Sandler, A.I., Lagutin, S.A., Gudov, E.A. Actual Issues of Design and Production of Advanced Worm Gears. *Advanced Gear Engineering, Mechanisms and Machine Science 51*, Springer Intern. Publishing AG Switzerland, 2018, – pp. 139-166.
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., 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. Мишкин, С.В. Профилирование и оптимизация установки шлифовальных кругов для затылования прецизионных червячных фрез // Известия вузов. Машиностроение. – №11. — 2007. – С. 63-68.
8. Лагутин, С.А., Сандлер, А.И. Построение функционально-ориентированной технологии второго порядка при

обработке зубчатых колес // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2017. – № 2 (68). – С. 31–35.

REFERENCES

1. Sandler, A.I. Technology for backing-off of gear-cutting hobs./ *Bulletin of IzhSTU named after M. T. Kalashnikov*, 2020, vol. 23, No. 4, pp. 29-38. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-29-38.
2. Sandler, A.I., Lagutin, S.A., Verkhovsky, A.V. Production of worm gears / under the general editorship of S.A. Lagutin. – M.: Mashinostroenie, 2008. pp. 272.
3. Sandler, A.I., Lagutin, S.A., Gudov, E.A. Theory and practice in manufacturing general worm gears / under the general editorship of S.A. Lagutin, M.: Vologda, Infra-Engineering, 2016, 346 p.
4. Sandler, A.I., Lagutin, S.A., Gudov, E.A. Actual issues of design and production of advanced worm gears. *Advanced gear engineering, mechanisms and machine science 51*, Springer intern. publishing AG Switzerland, 2018, pp. 139-166.
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., 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. Mishkin, S.V. Profiling and optimization of the installation of grinding wheels for tightening precision worm cutters. *Proceedings of higher educational institutions. Machine Building*, 2007, no. 11, pp. 63–68.
8. Lagutin, S.A., Sandler, A.I. The construction of a functionally oriented technology of the second order in the processing of gears. / *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2017, No. 2 (68), pp. 31-35.

Статья поступила в редакцию 18.11.2021; одобрена после рецензирования 13.12.2021; принята к публикации 13.12.2021.

The article was submitted 18.11.2021; approved after reviewing 13.12.2021; accepted for publication 13.12.2021.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Редактор Д.А. Петраченко. Технический редактор А.А. Алисов.

Сдано в набор 17.01.2022. Выход в свет 28.01.2022.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет"

12+