



УДК 621.833.38; 621.914.6  
DOI: 10.12737/24964

**А.И. Сандлер**, к.т.н.  
(ООО «СЭЛЭКШЕН», 127540, Москва, ул. Дубнинская, 12-1- 269)  
**С.А. Лагутин**, к.т.н., **Е.А. Гудов**, инженер  
(ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения»  
144005, г. Электросталь, Московской обл., ул. Красная, 19),  
E-mail: sandli@aha.ru; sergeyilagutin@gmail.com; gudove@inbox.ru

## **Модульные и функционально-ориентированные технологии в проектировании и производстве червячных передач**

*Червячные передачи относятся к наиболее наукоемким узлам в машиностроении. Их проектирование и производство представляет собой комплекс модульных и функционально-ориентированных технологий нескольких уровней (порядков). В этом комплексе технологий процессы проектирования и изготовления основных деталей передачи: червяка и червячного колеса, взаимосвязаны с аналогичными процессами формирования производящей поверхности зуборезного инструмента для червячного колеса.*

**Ключевые слова:** червячная передача; червяк; червячное колесо; червячная фреза; зубообработка; производящая поверхность инструмента.

**A.I. Sandler**, Can. Eng.,  
(OJ-SCo. "SELECTION", 12-1- 269, Dubninskaya Str., 127540, Moscow)  
**S.A. Lagutin**, Can. Eng., **E.A. Gudov**, Engineer  
(OJ-SCo. "Electrostal Plant of Heavy Engineering", 19, Krasnaya Str., Electrostal 144005, Moscow region)

## **Module and functionally-oriented techniques in designing and manufacturing worm gears**

*Worm gears of different purposes and dimensions belong to those objects of mechanical engineering which are connected with science intensive design works (computations and development of design arrangements) and with their not less science intensive technological realization in the course of production. In 2016 the authors published a training manual "Theory and practice of general worm gears production" (M. Infra-Engineering, 2016. – pp. 346) where there is generalized a scientific-production experience of enterprises of mechanical engineering and machine tools manufacture for the formation of the complex of modular and functionally-oriented technologies ensuring required quality and performance characteristics of such objects. As a distinctive feature of such a complex is the interconnection of design and production processes of gear basic parts: a worm, a worm wheel with similar processes in the formation of a producing surface in a gear-cutting tool for a worm wheel.*

**Keywords:** worm gear; worm; worm wheel; hob; tooth treatment; producing tool surface.

Пространственные передачи зацеплением, в том числе червячные с цилиндрическим червяком, глобoidные и спироидные, широко используются во многих современных машинах и механизмах. Червячные передачи, в частности, применяются в редукторах общемашиностроительного назначения, в нажимных механизмах прокатных станов, в приводах и кине-

матических цепях различных станков, в том числе, зубообрабатывающих.

В любых разновидностях червячных передач передаточное число многократно превышает отношение делительных диаметров червяка и колеса, что позволяет заменить одной компактной передачей многоступенчатый зубчатый редуктор. Однако компактность,

обязанная несовпадению делительных поверхностей с аксоидами передачи, органически обуславливает высокую скорость скольжения в контакте. Отсюда следуют значительные потери на трение, ускоренный износ, необходимость применения антифрикционных материалов и более низкие, по сравнению с зубчатыми цилиндрическими и коническими передачами, несущая способность и КПД.

Вопросам повышения качества и совершенствования технологии изготовления червячных передач посвящены работы [1–8].

Результаты указанных работ позволили установить основные тенденции развития чер-

вячных передач и сформировать основные модульные [9] и функционально-ориентированные технологии [10] их проектирования и изготовления с заданными эксплуатационными свойствами.

Как известно, основными элементами любой червячной передачи являются ведущий червяк 1 и ведомое червячное колесо 2, инструмент 3 для профилирования активных поверхностей витков рабочего червяка 1, производящий червяк 4 зуборезного инструмента для нарезания зубьев колеса 2, инструмент 5 для профилирования производящего червяка 4 (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема червячной передачи общего вида

Эта структура является основой для создания математической модели червячной передачи общего вида [1] и общей модульной технологии проектирования и производства любой червячной передачи. Внутри этой модульной технологии формируют комплекс модульных и функционально-ориентированных технологий, отличительной особенностью которых является взаимосвязь процессов проектирования и изготовления основных деталей передачи: червяка и червячного колеса, с аналогичными процессами формирования производящей поверхности зуборезного инструмента для червячного колеса. Таким образом, и модульные технологии, и функционально-ориентированные технологии создания червячных передач являются многоуровневыми.

### Проектирование цилиндрических червячных передач

Модульная технология проектирования червячных передач включает три этапа: геометрический и прочностной расчет, проектирование сборочной единицы редуктора или передачи с увязкой в общей сборке машины или узла, деталировка (разработка рабочих чертежей деталей передачи для изготовления). На сегодняшний день в Российской Федерации используется разработанная в 1970–80-е гг.

система государственных стандартов, которая включает в себя группу взаимоувязанных нормативных документов, регламентирующих расчет, разработку технической документации и производство цилиндрических червячных передач. Часть этих стандартов в 90-е годы была переработана в республике Беларусь.

Основополагающим из действующих стандартов является ГОСТ 18498-89 «Передачи червячные. Термины, определения и обозначения». Стандарт устанавливает термины, определения и буквенные обозначения понятий, относящихся к геометрии червячных передач, как с цилиндрическими червяками различных видов, так и с глобоидными. Согласно этому стандарту цилиндрическими червячными передачами называются передачи с цилиндрическим червяком. Рабочая поверхность витков цилиндрического червяка является винтовой поверхностью постоянного шага, равного или разного для двух сторон витка.

Основное деление цилиндрических передач производится по виду рабочих поверхностей. Различают два класса таких поверхностей: линейчатые и нелинейчатые. Линейчатые винтовые поверхности образуются винтовым движением прямой линии. Нелинейчатые винтовые поверхности образуются движением конуса, тора или некоторой кривой, и ни в одном из сечений витка не содержат прямой линии.

Из указанных трех этапов проектирования цилиндрических червячных передач, модульной технологией является расчет передач на основе архимедова, эвольвентного и нелинейчатого (образованного конусом) червяков [1]. Общими для этих передач являются следующие разделы расчета, которые, по сути своей, являются функционально-ориентированными технологиями проектирования, поскольку обеспечивают конкретные параметры качества и эксплуатационных характеристик передачи.

1. *Выбор конкретного вида профиля винтовой поверхности витка рабочего и производящего червяка* (архимедов, эвольвентный, нелинейчатый). Определяющей является возможность профилирования шлифовального круга при затыловании, и, следовательно, формирование профиля боковой затылуемой поверхности зубьев червячной фрезы. Показано, что при обработке архимедовых винтовых и затылованных поверхностей на шлифовальных станках с правкой круга по универсальному копиру шлифуемые поверхности органически не могут быть строго архимедовыми, а являются приближенными к ним или квазиархимедовыми [4].

2. *Геометрический расчет цилиндрической червячной передачи* на основе исходных данных: межосевое расстояние  $a_w$ , номинальное передаточное число  $u_{ном}$ , коэффициент делительного диаметра червяка  $q$  и модуль передачи  $m$ . Набор заданных конструктору данных может состоять лишь из передаточного числа  $u$ , числа оборотов червяка  $n_1$  и крутящего момента на колесе  $T_2$  либо мощности электродвигателя  $N_d$ . Завершают геометрический расчет передачи проверкой суммарного коэффициента перекрытия, который должен быть не менее 1.

3. *Выбор степени точности и назначение допусков*. Точность червячных передач нормирует ГОСТ 3675-81 «Передачи червячные цилиндрические. Допуски».

4. *Выбор материалов для червяка и колеса*.

5. *Расчет нагрузочной способности передачи с учетом условий ее эксплуатации*.

6. *Определение коэффициента полезного действия червячной передачи*.

7. На этапе разработки рабочих чертежей деталей передачи (червяка и колеса), модульная технология проектирования включает расчет контрольных зубоизмерительных параметров червяка и червячного колеса, которые указывают на рабочих чертежах.

### Проектирование глобоидных передач

Глобоидные передачи отличаются от пере-

дач с цилиндрическими червяками более высокой нагрузочной способностью, особенно при больших межосевых расстояниях. Помимо многопарности зацепления это обусловлено благоприятными свойствами контакта активных поверхностей. В глобоидной передаче линии мгновенного контакта расположены поперек зубьев и угол между линией контакта и вектором относительной скорости близок к прямому. Это благоприятствует условиям образования гидродинамического смазочного слоя, повышает КПД передачи и предотвращает появление зон, опасных по заеданию.

Модульная технология проектирования глобоидных передач состоит из следующих разделов.

1. *Геометрический расчет модифицированной глобоидной передачи*. В работе [1] уточнили методику расчета геометрических параметров передачи, предложенную в ГОСТ 17696-89 «Передачи глобоидные. Расчет геометрии». Эти уточнения относятся, прежде всего, к определению делительного диаметра червяка  $d_1$ , ширины венца глобоидного колеса  $b_2$  и параметров станочной модификации при нарезании червяка по методу *AU*.

2. *Расчет параметров станочного зацепления и установки резцов при нарезании червяка, модифицированного методом «AU»*. Этот этап проектирования является типичной функционально-ориентированной технологией, поскольку обеспечивает качество контакта и высокие эксплуатационные характеристики передачи без длительной ее приработки за счет модификации наладки резцов для нарезания витков червяка.

Наиболее широко используется способ модификации, при котором выполняется одновременное отклонение межосевого расстояния и передаточного числа в большую сторону от номинальных значений. Поскольку при этом способе можно при одной наладке станка модифицировать обе противоположные стороны витка, он получил название «двухстороннего бескоррекционного способа *AU*».

При расчете модификации по методу *AU* определяются такие параметры как число зубьев станочного производящего колеса  $z_{20}$ , увеличение станочного межосевого расстояния при зубообработке червяка  $\Delta a_0$ , делительный диаметр производящего колеса  $d_0$  и диаметр профильной окружности  $D_{p0}$ .

Расчет параметров станочной модификации необходим не только для разработки технической документации на червяк и сопряженное с

ним глобоидное колесо, но и для последующей разработки модульных технологий второго порядка – на проектирование инструментов для нарезания червяка и червячного колеса.

3. *Проектирование двух- и четырехрезцовых летучек для нарезания зубьев глобоидного колеса.* В индивидуальном производстве, как правило, используются двухрезцовые летучки, режущие кромки которых совпадают с крайними образующими крайних витков глобоидного червяка.

Однако при работе такими летучками имеет место подрезание поверхности зубьев червячного колеса входной кромкой резца-летучки, и большая часть поверхности зубьев после изготовления является несопряженной с поверхностью витка червяка. В этой связи для обеспечения номинальной нагрузочной способности колеса, нарезанные двухрезцовыми летучками, необходимо достаточно длительно прирабатывать.

Более прогрессивным методом нарезания зубьев глобоидных колес является использование трех- или четырехрезцовых фрез-летучек. Такой инструмент (патент РФ № 965652, В 23 F 21/20) успешно используется в последние годы на машиностроительных заводах. В этих фрезах два крайних резца образуют подрезные участки поверхности зуба колеса вблизи его торцов, а два средних резца выбирают «лунки» в средней части длины зуба колеса, достаточно близкие к требуемой форме обкатной поверхности.

Для расчета оптимального положения резцов четырехзубой летучки необходимо задать следующие параметры: число  $z_{10}$  витков производящего червяка; увеличение  $\Delta a_{10}$  станочного межосевого расстояния при обработке колеса по отношению к межосевому расстоянию передачи; число  $K_{kc}$  шагов между средним и крайним резцами; сдвиг  $\Delta_c$  профильной кромки среднего резца по отношению к образующей червяка; сдвиг  $\Delta_{kc}$  профильной кромки крайнего резца по отношению к среднему резцу; угол  $\varphi_k$  первоначального контакта в передаче на делительной линии витка.

После определения оптимального положения всех резцов выполняется расчет межосевых расстояний  $a_{10}$  и  $a_{00}$  и диаметров профильных окружностей для средних  $D_{roc}$  и крайних резцов  $D_{pok}$ , а также координаты положения вершин режущих кромок и ряд других параметров.

Выбор оптимального сочетания перечисленных выше параметров является наукоемким процессом и выполняется с помощью 3D-

моделирования станочного зацепления летучки с нарезаемым колесом, а затем рабочего зацепления червяка с нарезанным колесом.

Алгоритм подбора перечисленных данных и расчета остальных геометрических параметров четырехзубых летучек успешно реализован в программе «CalcGlob», которая была разработана на Электростальском заводе тяжелого машиностроения в 2008 г.

4. *Расчет нагрузочной способности глобоидной передачи с учетом условий ее эксплуатации.*

На несущую способность глобоидной передачи оказывает влияние сочетание различных факторов, к которым относятся габариты передачи, материалы венца колеса и червяка, характеристики смазки, скорость скольжения в зацеплении и точность изготовления передачи в целом. Также важную роль играют правильно назначенные коэффициенты условий работы передачи.

Совершенствование методов модификации глобоидных передач, с одной стороны, и новые возможности САПР, с другой стороны, потребовали уточнения и изменения в методах определения некоторых входящих коэффициентов. В работе [1] предложено выполнять расчет ряда коэффициентов аналитически с помощью математических редакторов, таких как MathCAD или его аналоги.

Эта методика позволяет с достаточно высокой практической точностью рассчитывать значения этих коэффициентов для глобоидных передач с любыми межосевыми расстояниями и передаточными числами.

5. *Коэффициент полезного действия глобоидной передачи.* В глобоидных передачах при расчете коэффициента полезного действия  $\eta_g$  можно выделить две основные составляющие: потери непосредственно в зацеплении  $\eta_z$  и потери на разбрызгивание и перемешивание масла  $\eta_m$  в масляной ванне. Потери на перемешивание масла  $\eta_m$ , кроме случаев работы глобоидной пары без жидкой масляной ванны (смазка поливанием, верхнее расположение червяка, консистентная смазка и т.д.) могут быть весьма существенными при использовании вязких масел в условиях пониженной температуры окружающей среды.

### Технологии производства червячных передач

Модульные технологии изготовления деталей червячных пар (червяков, червячных колес) включают прежде всего технологический маршрут формирования заготовки в готовую

деталь. В них входит также совокупность модульной технологии второго порядка проектирования червячного зуборезного инструмента для нарезания зубьев червячного колеса и функционально-ориентированных технологий, направленных на получение боковой поверхности витка червяка и производящей поверхности чистового зуборезного инструмента с требуемой точностью совпадения между ними.

Несовпадение поверхностей витков рабочего червяка передачи и производящего червяка зуборезного инструмента проявляется в виде трех погрешностей:

- несовпадения винтовых линий боковой поверхности витка червяка и производящей поверхности инструмента;
- отклонения осевого шага витка червяка относительно шага производящей поверхности,
- отклонения осевого профиля витка червяка относительно профиля производящей поверхности.

Допуски на отклонения винтовой линии и осевого шага витка червяка относительно их номинальных значений ГОСТ 3675–81 регламентирует в разделе «Нормы плавности работы для червяка». Аналогичные допуски задаются и для производящей поверхности червячной фрезы. Несовпадение поверхностей витков рабочего и производящего червяков определяется алгебраической разностью соответствующих отклонений. Поэтому для того, чтобы эти разности были минимальными, допуски на погрешности винтовой линии и осевого шага производящей поверхности фрезы и координаты средин полей этих допусков следует назначать равными соответствующим значениям для червяка.

Требуемая точность винтовой линии и осевого шага достигается с соответствующей настройкой кинематических цепей станков, на которых обрабатываются витки червяка и зубья червячной фрезы. В частности, если погрешность винтовой линии червяка зависит от точности передаточного отношения кинематической цепи «ходовой винт – шпиндель изделия» червячно-шлифовального станка, то отклонение производящей поверхности фрезы зависит от точности аналогичной цепи заточного станка и точности механизма деления заточного станка, на котором затачиваются винтовые передние поверхности зубьев.

Существенно более сложной является задача сближения с требуемой точностью осевых профилей витков рабочего и производящего

червяков, решение которой многократно усложняется для высокоточных, многозаходных и крупномодульных передач [1].

Модульные технологии изготовления червяков и червячных колес строят на основе технологических регламентов предприятия на соответствующие технологические маршруты, которые различаются оборудованием и степенью концентрации (или дробления) операций для обработки деталей заданных габаритов и заданной серийности производства.

Важным в этом процессе является выбор функционально-ориентированных технологий обеспечения с требуемой точностью совпадения осевых профилей витков рабочего червяка и производящей поверхности зуборезного инструмента.

В условиях серийного производства под каждый типоразмер передачи (рабочего червяка) проектируют и изготавливают чистовой зуборезный инструмент (точную червячную фрезу). Для единичного или опытного образца передачи предпочитают использование червячной фрезы из наличия, обеспечивая совпадение профилей рабочего и производящего червяков путем регулирования угла профиля витка червяка (метод первичности зуборезного инструмента) [1], допуская некоторое уменьшение длины пятна контакта на ширине зубчатого венца колеса.

Для любой реальной зубчатой передачи – в силу неизбежных погрешностей изготовления и сборки, а также влияния силовых и температурных деформаций, возникающих в процессе работы, с целью компенсации этих явлений, – зацепление следует проектировать как приближенное, вводя преднамеренное отклонение угла поворота ведомого звена в период зацепления одной пары зубьев.

В червячных передачах идентичность рабочего и станочного зацеплений, совпадение формы и положения поверхностей производящего и рабочего червяков могли бы обеспечить строгую сопряженность рабочего зацепления. Поэтому его приближенность нужно вводить искусственно, модифицируя одну поверхность относительно другой так, чтобы при любых допустимых погрешностях изготовления и сборки пятно контакта не выходило ни на одну из кромок зуба, а точность передачи по нормам плавности оставалась в пределах допуска.

Основными показателями качества червячных пар и передач являются нормы контакта зубьев колеса с витками червяка, в том числе суммарное пятно контакта с нормированием

его по высоте и длине зубьев, а также плавность работы передачи.

Погрешности изготовления червяка и колеса, а также сборки передачи, особенно заметно проявляются в начальный период ее работы, когда «уводят» пятно контакта на одну из кромок зуба, резко повышая контактные напряжения и сводя к минимуму возможность образования смазочного слоя. В этой связи эффективным средством повышения качества червячных передач является локализация первоначального контакта в заданной зоне поверхности зуба колеса, устраняющая необходимость длительной приработки передачи.

Функционально-ориентированные технологии формирования локализованного контакта в передаче основаны на модификациях геометрических параметров производящего червяка червячных фрез и модификации профиля витка рабочего червяка. Под модификацией производящего червяка следует понимать не только отличие размеров и параметров профиля червячной фрезы относительно рабочего червяка, но и регулирование наладочных элементов зубофрезерного станка, на котором нарезают червячное колесо.

Вышесказанное не снижает принципиальных требований к точности производящей поверхности фрезы и сохранению этой точности при переточках. Речь идет только о том, в какую сторону должны быть направлены отклонения. Например, при переточке фрезы меняется угол ее осевого профиля, и чтобы, заботясь о взаимозаменяемости, каждый раз не подгонять под нее профиль червяка, заданная стрелка выпуклости профиля червяка или вогнутости профиля зуба фрезы должна быть достаточной для того, чтобы искажение угла профиля не вводило контакт на одну из наружных кромок. Если при переточке фрезы уменьшается ее диаметр, то изначально он должен быть больше диаметра червяка и т.д.

С функциональной точки зрения существенное значение имеет направление локализации не по отношению к профилю или длине зуба, а по отношению к номинальной линии мгновенного контакта.

Локализация вдоль этой линии не изменяет мгновенного передаточного отношения и в то же время предотвращает возможность выхода пятна контакта на торцевые кромки зуба, т.е. позволяет полностью или частично компенсировать отрицательное влияние погрешностей сборки, силовых и температурных деформаций корпуса.

Локализация в направлении, нормальном к

линии мгновенного контакта, обуславливает непостоянство мгновенного передаточного отношения в процессе зацепления одной пары зубьев, но сглаживает кромочные удары при пересопрежении зубьев и тем самым позволяет компенсировать шаговые погрешности зубонарезания и деформацию зубьев под нагрузкой.

Из-за различия в характере линий контакта на боковой поверхности зуба профильная и продольная модификация в разных типах передач могут давать неравноценные эффекты.

В глобоидных передачах линии контакта составляют с вектором окружной скорости червяка угол, близкий к прямому, поэтому профильная модификация преимущественно снижает чувствительность передачи к погрешностям монтажа, а продольная – сглаживает непостоянство передаточного отношения. Аналогичные эффекты имеют место в передачах с цилиндрическими червяками типа ZT [4].

В червячных передачах с линейчатым, в частности, архимедовым червяком мгновенные линии контакта вытянуты вдоль зуба колеса, и модификация поверхности зуба по его длине – продольная – компенсирует погрешности взаимного расположения осей червяка и червячного колеса. Влияние погрешностей шага и профиля активных поверхностей витка червяка и зубьев колеса снижают модификацией поверхностей зубьев в направлении, перпендикулярном к мгновенным линиям контакта, т.е. профильной локализацией.

### Проектирование и производство червячных фрез для червячных колес

Создание точных червячных фрез для червячных колес требует решения ряда серьезных технологических задач, связанных с проектированием фрез, их изготовлением и эксплуатацией. В первую очередь к таким задачам относятся:

1) обеспечение условий нормального резания путем исключения образования отрицательных задних углов в процессе обработки колеса;

2) расчет и распределение полей допусков на углы профиля затылованной поверхности фрезы и витка червяка, при которых гарантируется плавность работы передачи;

3) управление процессами заточки и затылования зубьев фрез, особенно многозаходных и крупномодульных, при обработке которых многократно возрастают органические погрешности формы поверхностей, формирую-

щих режущие кромки зубьев фрезы.

Технологичность изготовления и эксплуатационные характеристики червячных фрез для червячных колес закладываются в процессе их проектирования и зависят от многих конструктивных параметров, в частности, количества зубьев фрезы в ее торцовом сечении, исходного контура производящего червяка, углов развала и наклона стружечной канавки и др.

Так, достаточность угла "развала" стружечной канавки влияет на качество заточки передней поверхности, поскольку лимитирует определенную величину угла профиля заточного круга. А обеспечение параметров точности производящей поверхности начинается с выбора исходного контура производящего червяка, реализация которого зависит от технических возможностей не только червячно-шлифовального, но и затыловочного станков, а также средств контроля профилей витка червяка и затылованной поверхности зуба фрезы.

При разработке конструкторской документации проектировщик должен учитывать, что червячные фрезы, предназначенные для нарезания червячных колес, отличаются от фрез для нарезания зубьев цилиндрических передач, как правило, меньшим относительным диаметром и большим углом подъема витка, особенно для двух- и многозаходных передач. А все погрешности, органически связанные с процессами затылования и заточки зубьев фрезы примерно пропорциональны квадрату тангенса этого угла.

Кроме того, для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик фрез в процессе их проектирования необходимо учитывать многие факторы, над которыми конструкторы раньше просто не задумывались, в частности, распределение полей допусков на погрешности профилей производящей поверхности фрезы и витков червяка при их изготовлении и ограничение числа периодических переточек зубьев фрезы.

В этой связи проектирование червячных фрез для червячных колес имеет свои особенности, которые не вполне учитываются действующими руководящими материалами и справочниками, в большей мере посвященными проектированию инструмента для зубонарезания цилиндрических зубчатых колес.

Процесс конструкторско-технологической подготовки производства червячных фрез для червячных колес включает ряд этапов. В их числе: определение конструкции и расчет конструктивных параметров фрезы; разработ-

ка технологического процесса изготовления червячной фрезы, включая инструмент второго порядка и оптимизацию наладок заточного и затыловочного станков; метрологическое обеспечение контроля параметров точности фрез в процессе изготовления; паспортизация фрез при выпуске и в течение срока эксплуатации.

Модульная технология проектирования фрез для червячных колес должна уточнять следующие параметры:

- оптимальное количество зубьев фрезы в ее торцовом сечении;
- необходимые задние углы у боковых режущих кромок зубьев и элементы наладок затылования для их обеспечения;
- расхождение осевых углов профиля витка червяка и боковых затылков зубьев и их отражение в рабочем чертеже фрезы;
- допуск на отклонение передней поверхности зубьев фрезы от радиальности с учетом формы образующей этой поверхности;
- допуски на отклонения винтовой поверхности витка червяка от производящей поверхности зуборезной фрезы;
- допустимое число переточек червячной фрезы, обеспечивающее сохранение точности фрез при переточках.

Основными функционально-ориентированными технологиями, определяющими профиль производящей поверхности червячной фрезы, являются: шлифование винтовых передних поверхностей зубьев фрезы и затылование боковых поверхностей ее зубьев. Причем для червячных передач 6–12 степеней точности именно процесс затылования оказывает превалирующее влияние на профиль производящей поверхности.

Следует отметить, что процессы обработки шлифованием боковых поверхностей зубьев червячной фрезы и витков червяка весьма сходны по геометрии станочного зацепления. Более того, построение наладки червячно-шлифовального станка и схема относительно перемещения абразивного круга и изделия при шлифовании витков червяка являются частным случаем наладки процесса затылования шлифовальным кругом боковых поверхностей зубьев фрезы.

В связи с этим указанные процессы обработки червячных фрез и червяков следует рассматривать по единой структурной схеме, и в выборе профиля исходного контура передачи именно технологические возможности профилирования боковых поверхностей зубьев фрезы на шлифовально-затыловочном станке имеют решающее значение.

**Функционально-ориентированная  
технология обеспечения  
качества поверхностного слоя**

Одним из важных аспектов производства червячных передач, является обеспечение качества поверхностного слоя витков рабочих червяков, а также зубьев фрез, на операциях шлифования и затылования абразивными кругами. Основные параметры качества поверхностного слоя, а именно, отсутствие прижогов и трещин на шлифуемых поверхностях, достижение требуемого параметра шероховатости, зависят от правильного выбора абразивных характеристик шлифовальных кругов и режимов шлифования.

Прижоги, т.е. местные изменения структуры поверхностного слоя металла, возникают в зоне резания при шлифовании под воздействием мгновенных температур порядка 400...1500 °С и приводят к изменению физико-механических свойств обработанной поверхности: микроструктуры, микротвердости и остаточных напряжений, а также к локальным вырывам в местах интенсивного нагрева, глубина которых достигает 5...10 мкм и более.

Эти вырывы материала искажают профиль шлифуемой поверхности. Трещины представляют собой разрыв поверхностного слоя материала заготовок под воздействием внутренних напряжений растяжения, значение которых на этих участках превышает предел прочности материала на разрыв.

Выбор абразивных характеристик шлифовальных кругов и назначение режимов шлифования является важной функционально-ориентированной технологией для любой операции обработки абразивным инструментом, особенно если обработку производят без применения смазочно-охлаждающих жидкостей.

**Заключение**

Современное построение технологической науки в машиностроении, направленное на типизацию конструкторских и технологических объектов производства, ориентировано на создание модульных и функционально-ориентированных технологий в проектировании и в производстве.

Это позволяет наукоемкие объекты производства, включая исследованные и выявленные их новые свойства, описать как комплексы модульных и функционально-ориентированных технологий, и заводам-производителям воссоздавать эти объекты в реальных условиях собственного производства.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Сандлер, А.И., Лагутин, С.А., Гудов, Е.А. Теория и практика производства червячных передач общего вида: учебно-практическое пособие. – М.: Вологда, Инфра-Инженерия. 2016. – 346 с.
2. Lagutin S.A. Local Synthesis of General Type Worm Gearing and its Applications // Proc. of the 4th World Congress on Gearing and Power Transmissions. Paris. Vol.1, pp. 501–506 (1999).
3. Лагутин, С.А., Долотов, С.В. Технологический синтез червячных передач с локализованным контактом // Вестник машиностроения. – 2005. – № 4. – С. 10–14.
4. Сандлер А.И., Лагутин С.А., Верховский А.В. Производство червячных передач / под общ. ред. С.А. Лагутина. – М.: Машиностроение, 2008. 272 с.
5. Сандлер А.И. Технология профильной локализации в червячных передачах // «СТИН» Станки инструмент. – 2012. – №3. – С. 11–18.
6. Сандлер, А.И., Лагутин, С.А., Гудов, Е.А. Технология продольной локализации контакта в червячных передачах // «СТИН» Станки и инструмент. – 2013. – №12. С. 24–31.
7. Lagutin S., Gudov E., Fedotov B. Manufacturing and Load Rating of Modified Globoid Gears // Balkan Journal of Mechanical Transmissions (BJMT), Vol. 1, Issue 2, pp. 45-53 (2011).
8. Лагутин, С.А., Сандлер, А.И. Шлифование винтовых и затылованных поверхностей. – М.: Машиностроение. 1991. – 110 с.
9. Базров, Б.М. Модульная технология в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.
10. Михайлов, А.Н., Михайлова, Е.А. Научно-технические функционально-ориентированные технологии в машиностроении // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – №1(01). – С. 8–18.

**REFERENCES**

1. Sandler, A.I., Lagutin, S.A., Gudov, E.A. Theory and practice in manufacturing general worm gears: training manual. – М.: Vologda, *Infra-Engineering*. 2016. – pp. 346.
2. Lagutin S.A. Local Synthesis of General Type Worm Gearing and its Applications // Proc. of the 4th World Congress on Gearing and Power Transmissions. Paris. Vol.1, pp. 501–506 (1999).
3. Lagutin, S.A., Dolotov, S.V. Technological synthesis of worm gears with localized contact // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2005. – № 4. – pp. 10–14.
4. Sandler A.I., Lagutin S.A., Verkhovsky A.V. *Production of Worm Gears* / under the general editorship of S.A. Lagutin. – М.: Mechanical Engineering, 2008. pp. 272.
5. Sandler A.I. Profiled localization technology in worm gears // “*STIN*” *Machines and Tool*. – 2012. – №3. – pp. 11–18.
6. Sandler, A.I., Lagutin, S.A., Gudov, E.A. Technology of longitudinal contact localization in worm gears // “*STIN*” *Machines and Tool*. – 2013. – №12. pp. 24–31.
7. Lagutin S., Gudov E., Fedotov B. Manufacturing and Load Rating of Modified Globoid Gears // Balkan Journal of Mechanical Transmissions (BJMT), Vol. 1, Issue 2, pp. 45-53 (2011).
8. Lagutin, S.A., Sandler, A.I. *Grinding of Screw and Relief Surfaces*. – М.: Mechanical Engineering. 1991. – pp. 110.
9. Bazrov, B.M. *Modular Technology in Mechanical Engineering*. – М.: Mechanical Engineering, 2001. – pp. 368.
10. Mikhailov, A.N., Mikhailova, E.A. Science intensive functionally-oriented techniques in mechanical engineering // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2011. – №1(01). – pp. 8–18.

Рецензент д.т.н. В.В. Клепиков