

Н2С-интерфейсов, которые предполагают формирование инструкций по перемещению активных зон устройства через демонстрацию таких движений человеком-оператором. В зависимости от конструкций, роботизированная платформа может либо воспроизводить движения человека, либо определять «ожидаемые пользователем действия», которые необходимо выполнить.

Для построения таких систем в последовательность обработки данных добавляется несколько этапов. На следующем этапе, после «считывания» скелета, массив координат узлов «виртуального скелета» оператора накладывается на массив точек, ассоциированный с опорной поверхностью (полом), и на основании этого производится расчёт базисных матриц и матриц поворота зоны опоры и торсового узла.

Завершающей фазой обработки является «вписание» виртуальной модели антропоморфного робота в имеющуюся систему узлов с учетом возможностей его кинематики и необходимостью правильного размещения опорных поверхностей (стоп) для устойчивого стояния.

Выбранный в качестве исполнительного механизма робот Bioloid в модификации Р имеет такое расположение осей вращения узлов, что прямая кинематическая задача для конечностей имеет простое решение. После соответствующей математической обработки получается массив углов поворотов осей сервоприводов, которые обеспечивают принятие роботом нужной позы. Таким образом, робот как бы «зеркалит» оператора, копируя положение его тела.

Разработанный метод может быть использован при создании систем программного управления роботизированных систем, чтобы дать возможность оператору задавать движения робота через их непосредственный «показ». Это позволит экономить много времени при настройке роботизированной системы на определенный характер движения.

А также при решении задачи динамической стабилизации робота при быстрой смене поз можно реализовать систему непосредственного управления движением робота путем копирования движения оператора.

По сравнению с подходом, основанном на использовании специального сенсорного костюма управления, достоинством предложенного метода является реализация системы бесконтактного управления антропоморфным роботом. При необходимости считывание поз оператора может производиться камерой, размещённой на самом роботе, что позволяет сделать робота достаточно автономным.

В дальнейшем планируется внедрить в программное обеспечение робота возможность полноценного управления всеми перемещениями с помощью различных жестов и наклонов корпуса, а также продолжить исследования на других типах робототехнических систем.

### Литература

1. Войцеховский Я. Дистанционное управление моделями. Пособие моделиста и радиолюбителя. Пер. с польск. / Под ред. А.П. Павлова и Н.Н. Путятин. – М.: Связь, 1977, 432 с.
2. Готшалк О.А. Системы автоматизации и управления. Конспект лекций. – С.-Пб.: СЗПИ, 1998, 35 с.
3. Stephane Piskorski, Nicolas Brulez, Pierre Eline. AR.Drone Developer Guide. Parrot S.A. 2012, 107 с.
4. US Patent Application № 20120278904, Microsoft corporation, Redmond, November 1, 2012.

### **Перспективы развития обкатного зубофрезерования цилиндрических колёс**

д.т.н. Калашников А.С., к.т.н. Моргунов Ю.А., к.т.н. Калашников П.А., Котькина Т.В.

Университет машиностроения  
8-916-3768356, morgunov@mami.ru

*Аннотация.* Рассмотрены условия зацепления червячной фрезы с профилем

зубьев цилиндрического колеса при образовании эвольвенты. Описаны конструкции сборных и цельных червячных фрез. Рассмотрены режимы резания: скорости резания и осевые подачи.

*Ключевые слова:* обкатное зубофрезерование, точность зубчатых колёс, сборные и цельные червячные фрезы

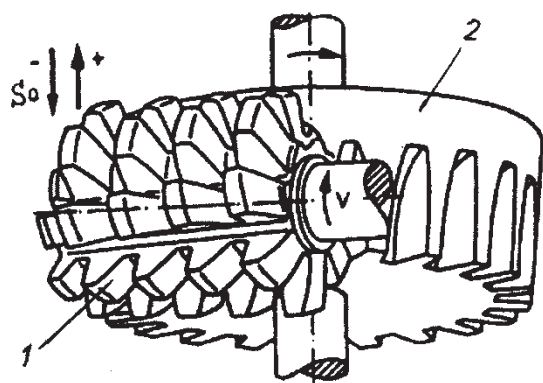
Несмотря на то что обкатное зубофрезерование червячными фрезами известно уже более 100 лет, его широко применяют в современной машиностроительной промышленности благодаря универсальности, а также высоким показателям производительности и точности. На зубофрезерных станках червячными фрезами нарезают зубчатые колёса внешнего зацепления с прямыми и косыми зубьями, конусной и бочкообразной формы, червячные колёса, шлицевые соединения с прямобочным и эвольвентным профилем, звёздочки цепных передач и другие детали.

При обработке зубчатых колёс с твёрдостью HB 150-200 цельными и сборными червячными фрезами класса А (ГОСТ 9374-80) стабильно достигается 8-9 степень по ГОСТ 1643-81 и шероховатость поверхности Ra 1,6-5,0 мкм. Если требуется более высокая 7-8 степень точности, то применяют червячные фрезы класса АА, зубофрезерные станки и технологическую оснастку высокой точности и жёсткости в статическом состоянии и под рабочей нагрузкой.

Для обеспечения изгибной и контактной выносливости стальные зубчатые колёса обычно подвергают химико-термической обработки (ХТО). В результате ХТО поверхность зубьев получает высокую твёрдость HRC 58-63 и вязкую сердцевину HRC 33-45. Однако под действием термических деформаций точность зубьев снижается на 1-2 степени.

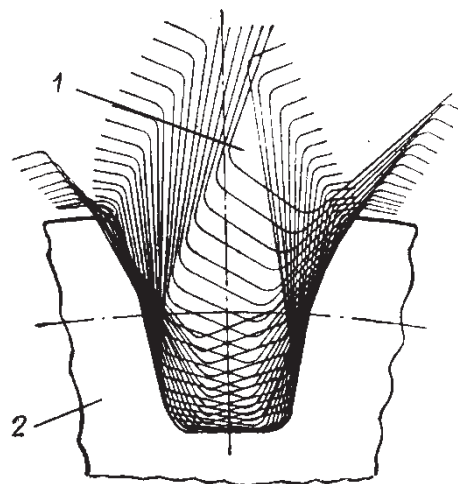
В связи с этим зубофрезерование червячными фрезами применяют в качестве:

- предварительной обработки зубьев под последующее шевингование, шлифование, хонингование;
- окончательной обработки зубьев цилиндрических колёс общего машиностроения невысокой точности, например крупномодульных с внешним диаметром  $\geq 1500$  мм.



**Рисунок 1. Принцип образования зубьев цилиндрических колёс червячной фрезой**

При фрезеровании зубчатого колеса 2 (рисунок 1) методом обката профиль зубьев образуется червячной фрезой 1 с исходным контуром производящей зубчатой рейки при скорости главного движения резания  $V$  и подачи на оборот  $S_o$ . Червячная фреза является червяком, ее витки разделены продольными стружечными канавками на отдельные зубья с прямолинейным профилем, у которых в результате затылования возникают задние и боковые углы, необходимые для обработки резанием. Эвольвентный профиль зубьев колеса образуется прямолинейными режущими кромками фрезы в результате их взаимного обката.



**Рисунок 2. Схема образования эвольвентного профиля зубьев**

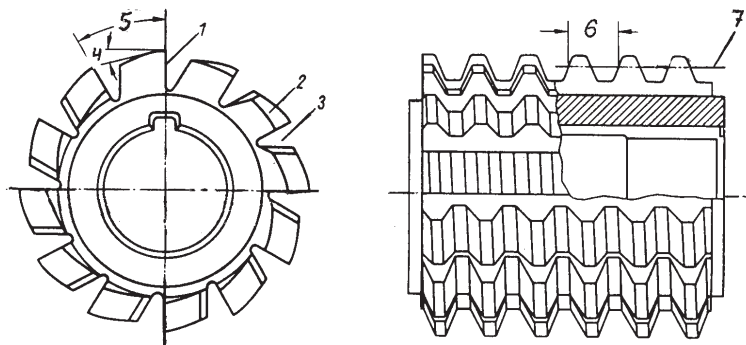
На рисунке 2 показано, как следующие один за другим зубья 1 червячной фрезы входят в контакт с боковыми поверхностями и дном впадины зубьев колеса 2 и формируют звольвентный профиль.

Наибольшее распространение получили методы зубофрезерования червячной фрезой с осевым, радиально-осевым и диагональным движением подачи, а также двухпроходное зубофрезерование.

*Червячная фреза* представляет собой одно-, двух- или многозаходный червяк, который имеет исходный контур зубчатой рейки, а расположенные вдоль оси (параллельно или наклонно) продольные стружечные канавки образуют затылованные зубья с режущими кромками, необходимыми для обработки резанием.

В промышленности преимущественно применяют цельные, сборные и червячные фрезы с напайными или механически закрепленными пластинами.

*Цельные червячные фрезы* (рисунок 3) изготавливают из быстрорежущей стали диаметром до 500 мм и из твердого сплава диаметром до 140 мм. Наиболее часто для червячных фрез применяют быстрорежущие стали повышенной теплостойкости (до 620-650°C) марок P6M5K5, P18Ф2K5 и др. Возрастает применение *червячных фрез из порошковых быстрорежущих сталей* с диаметром до 250 мм. Преимущество таких сталей обусловлено мелкозернистой структурой, равномерным распределением карбидов по всей массе материала и отсутствием вредных примесей. Кроме того, современная порошковая металлургия позволяет свободно комбинировать различные легирующие элементы, повышая режущие свойства основного металла. Порошковые быстрорежущие стали, как и твердые сплавы, можно использовать для обработки зубчатых колес как с применением СОЖ, так и без СОЖ. Положительные свойства фрез из порошковых быстрорежущих сталей: высокая надёжность и воспроизводимость процесса зубофрезерования, хорошие режущие показатели и низкая стоимость способствуют расширению области их применения за счёт вытеснения твёрдосплавных фрез.



**Рисунок 3. Цельная червячная фреза: 1-передняя поверхность; 2-задняя поверхность; 3-стружечная канавка; 4-угол по задней поверхности; 5-угловой шаг стружечных канавок; 6-осевой шаг; 7-делительный диаметр**

*Твёрдые сплавы* получают методом порошковой металлургии в виде монолитных заготовок и пластин. Червячные фрезы из твёрдых сплавов имеют высокую твёрдость 71-75 HRC и теплостойкость до 850-1000°C, что позволяет им работать с высокими скоростями резания. При зубофрезеровании под действием сил резания червячные фрезы подвергаются изгибным нагрузкам. Поэтому с целью повышения прочности при изгибе их изготавливают из твёрдых сплавов с мелкими размерами зёрен (0,6-1,4 мкм) карбидов. Увеличение объёмных долей кобальта в твёрдом сплаве повышает предел его прочности при изгибе, поэтому хорошими режущими свойствами обладают червячные фрезы из твёрдых сплавов T5K10, T14K8 и др.

*Сборные червячные фрезы с поворотными вставными рейками* широко применяют в промышленности. Эти фрезы по сравнению с цельными имеют следующие преимущества:

- большой задний угол при вершине 13°-18°, у цельных фрез - 10°-12°;
- длина режущей части зуба до 27 мм, что в 3-5 раз превышает длину зуба цельной фрезы;
- геометрия зуба фрезы позволяет применять большие осевые и радиальные подачи.

Сборные фрезы изготавливают с внешним диаметром до 300 мм. Длина реек, как правило, равна 220 мм. Обычно число реек фрезы составляет 12, но применяют также 11-15. Число заходов фрезы ограничено возможностью появления отрицательных значений углов по боковым сторонам зубьев фрезы при угле подъема витка более  $6^\circ$ , в сборных фрезах оно может быть от 1 до 3.

Обычно сборные червячные фрезы работают с однократным износостойким покрытием. При восстановлении изношенных фрез выполняют только заточку по передней поверхности зубьев, а износостойкие покрытия не возобновляются. Режимы резания для сборных червячных фрез: скорость резания 60-90 м/мин, осевая подача 3-6 мм/об. Величину осевой подачи следует уменьшить при увеличении модуля, глубины резания, числа заходов фрезы и увеличить при большом числе зубьев заготовки, числе реек и диаметре фрезы. Сборные червячные фрезы с поворотными рейками применяют для нарезания эвольвентных зубчатых колёс с модулем 0,5-12 мм, а также для шлицевых валов, цепных колёс и других деталей.

*Многозаходные червячные фрезы* в отличие от однозаходных имеют не одну винтовую линию (виток) на наружной цилиндрической поверхности, а две и более. Однозаходная фреза за один оборот нарезает один зуб, двухзаходная – два зуба, трёхзаходная – три зуба. С увеличением заходности фрез частота вращения заготовки повышается. Сечение срезаемой стружки, а следовательно, нагрузка на зуб фрезы при нарезании многозаходными фрезами больше, чем при обработке однозаходными, поэтому подачу при обработке многозаходными фрезами приходится уменьшать. Обычно при замене однозаходных фрез двухзаходными производительность увеличивается на 40...50%, а при применении трехзаходных – на 60...70%.

Для повышения режущих свойств червячных фрез их покрывают износостойкими покрытиями. Наибольшее распространение для червячных фрез получили износостойкие покрытия: нитрид титана (TiN), карбонитрид титана (TiCN), нитрид титана алюминия (TiAlN) и хромнитрид алюминия (AlCrN).

Нанесение износостойких покрытий на червячные фрезы осуществляют методом физического осаждения (PVD), при котором твердый исходный материал за счет тепловой или кинетической энергии в специальных камерах осаждается тонким равномерным слоем на инструмент. Покрытия этим методом наносятся при температуре не выше  $450^\circ\text{C}$ , что гарантирует сохранение твердости, физических свойств и структуры металла червячной фрезы.

Применение износостойких покрытий позволяет повысить стойкость червячных фрез в 2-7 раз и производительность за счет увеличения скорости резания. У изношенных червячных фрез необходимо восстановить режущую способность. Восстановление червячных фрез можно производить с возобновлением износостойкого покрытия и без повторного покрытия. В первом случае у изношенных фрез химическим способом в кислотной среде с помощью перекиси водорода удаляют старое покрытие. Затем выполняют струйную очистку стальными шариками  $\varnothing 50-120$  мкм со скоростью 60-120 м/с. После чего фрезу затачивают по передней поверхности, полностью удаляя износ, и выполняют новое покрытие. Червячные фрезы, износостойкое покрытие которых не возобновляется, при восстановлении только затачивают по передней поверхности. Режущие свойства червячных фрез с многократным покрытием значительно выше, чем у фрез с однократным покрытием.

В таблице 1 приведены рекомендуемые скорости резания и осевые подачи при обработке заготовок зубчатых колес из легированной стали с твердостью HB 150-200.

*Зубофрезерование можно производить с подачей смазочно-охлаждающей жидкости и без подачи СОЖ.* В качестве СОЖ применяют минеральные и синтетические масла. Синтетические масла более совместимы с окружающей средой, так как не содержат хлора, тяжелых металлов и ароматических углеводородов. При использовании СОЖ станки должны быть оснащены мощными установками для удаления масляного тумана, не допуская его эмиссии в окружающую среду.

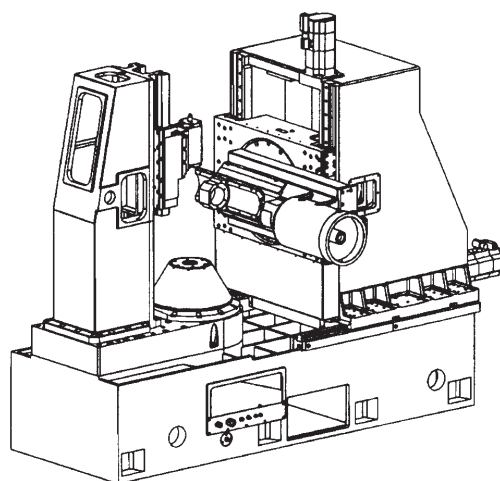


**Скорости резания и осевые подачи при обработке червячными фрезами**

Материал червячной фрезы	Кованная быстрорежущая сталь с покрытием			Порошковая быстрорежущая сталь с покрытием		Твердый сплав с покрытием	
Условия обработки	с СОЖ			без СОЖ	с СОЖ	без СОЖ	с СОЖ
Модуль зубчатого колеса, мм	$\leq 5$	$\leq 12$	$> 12$	$\leq 5$	$\leq 5$	$\leq 4$	$> 4$
Скорость резания, м/мин	70-100	60-90	30-70	130-170	120-170	220-300	100-250
Осевая подача, мм/об	4-8	3-5	2-4	3-5	3-4	3-5	3-5

*Зубофрезерование без СОЖ* экономически более эффективно и экологически безопасно для окружающей среды. Обработку производят червячными фрезами из порошковой быстрорежущей стали (число заходов 1-3) и твёрдого сплава (число заходов 1) заготовок зубчатых колёс с модулем соответственно до 5 мм и до 4 мм. В зависимости от режимов резания и геометрии зубчатого колеса температура заготовки при обработке не должна превышать 30-50°C. Для обеспечения термического баланса зубофрезерного станка мощным потоком воздуха удаляют стружку, образующуюся в зоне резания. При этом станок снабжают термостойким кожухом и специальными устройствами для удаления и транспортирования стружки и металлической пыли. Хорошие результаты при обработке без СОЖ получают при использовании зубофрезерования за два рабочих хода.

*Современные зубофрезерные станки* имеют высокоэффективную систему ЧПУ, повышенную статическую и динамическую жёсткость основных узлов, длинные и широкие направляющие, большое осевое перемещение фрезы (160...300 мм), обильное охлаждение зоны резания с расходом СОЖ 200...400 л/мин. Частоты вращения фрезы 150...3000 об/мин позволяют применять многозаходные твёрдосплавные и быстрорежущие червячные фрезы с износостойкими покрытиями.

**Рисунок 4. Зубофрезерный станок с ЧПУ**

В зависимости от расположения оси обрабатываемой заготовки зубофрезерные станки могут иметь горизонтальную или вертикальную компоновку. Среди отечественных станков следует отметить зубофрезерные станки с вертикальной компоновкой следующих моделей: 5320/80/125Ф4 ( $d_{\max} = 200/800/1250$  мм,  $t_{\max} = 6/12/16$  мм). Общее число осей ЧПУ – 7, в том числе 4-е одновременно управляемые оси (рисунок 4).

**Выводы**

Для применения в промышленности высокопроизводительного зубофрезерования необходимы:

- современные зубофрезерные станки с высокопроизводительной системой ЧПУ (например, «Синумерик 840D»), обеспечивающей выполнение основных методов зубофрезерования, повышенной статической и динамической жёсткостью основных узлов, мощностью главного привода 25-30 кВт и бесступенчатым регулированием частоты вращения шлифовального шпинделя и шпинделя заготовки;
- червячные фрезы из порошковых быстрорежущих сталей и твёрдых сплавов, в том числе многозаходные, с маленьким внешним диаметром и большим числом стружечных каналов, с износостойкими покрытиями, как правило, возобновляемыми;
- надёжные быстродействующие зажимные приспособления, в том числе гидропластовые с возможностью увеличения посадочной втулки на 3-5% под действием гидравлической жидкости.

### Литература

1. Калашников А.С., Моргунов Ю.А., Калашников П.А. Современные методы обработки зубчатых колёс. Издательский дом «Спектр», Москва, 2012, 238 с.
2. Саушкин Б.П., Шандров Б.В., Моргунов Ю.А. Перспективы развития и применения физико-химических методов и технологий в производстве двигателей. // Известия МГТУ «МАМИ», 2012, № 2, с. 242-248.
3. Виноградов В.М., Черепяхин А.А. Критерии оптимизации зубообрабатывающих операций, основанных на различных методах формирования зубьев. М., // Известия МГТУ «МАМИ», № 2 (14), т. 2, 2012. с. 238-242.
4. Типалин С.А., Шпунькин Н.Ф., Никитин М.Ю., Типалина А.В. Экспериментальное исследование механических свойств демпфирующего материала // Известия МГТУ «МАМИ», 2010. № 1. с. 166-170.

### **Особенности протягивания отверстий инструментом с регулярным микрорельефом**

д.т.н. проф. Колтунов И.И., к.т.н. проф. Лобанов А.С.

Университет машиностроения

8 (495) 223-05-23, доб.1206, iik@mami.ru, isidt@mami.ru

*Аннотация.* В работе представлена методика расчета сил деформирования при протягивании отверстий деталей рабочими элементами протяжек с регулярным микрорельефом с учетом фактической площади контакта взаимодействующих поверхностей.

*Ключевые слова:* обработка, силы деформирования, регулярный микрорельеф, площадь контакта, контактные давления.

Важнейшей характеристикой процесса обработки отверстий деформирующими протяжками является сила деформирования, так как ее значение необходимо для расчета на прочность рабочих элементов, коэффициента трения, контактных давлений, температуры в зоне контакта инструмента с изделием, деформации обрабатываемой заготовки, а также для выбора оборудования, рациональных смазок и ряда других параметров.

Имеющиеся теоретические и эмпирические зависимости для определения сил деформирования не учитывают влияния фактической площади контакта деформирующих элементов с обрабатываемой заготовкой, несмотря на то что данный фактор является достаточно существенным.

Это объясняется тем, что для деформирующих протяжек используются рабочие элементы с гладкими рабочими поверхностями, микрорельеф которых формируется традиционными методами финишной обработки (полированием, доводкой). В связи с тем что данные методы обработки не однородны по своей природе, образующийся микрорельеф рабочих по-