

UDC 621.634

## Spetsanov N.S., Krasnova M.N. The manufacturing process of bevel gears

Процесс изготовления конических шестерен

**Spetsanov Nikita Sergeevich,**

Master

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
"Voronezh State Technical University"

**Krasnova Marina Nikolaevna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering  
Technology

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
"Voronezh State Technical University"

Спецанов Никита Сергеевич,  
магистр

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Воронежский государственный  
технический университет»

Краснова Марина Николаевна

к. т. н, доцент кафедры технологии  
машиностроения Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Воронежский государственный  
технический университет»

**Abstract.** *Bevel gear transmissions represent an essential element of modern mechanical engineering, ensuring torque transmission between intersecting or crossed shaft axes. The manufacturing technology of bevel gears includes a complex of operations from blank production to final finishing of the gear ring. Particular attention in the production process is paid to the accuracy of tooth surface formation, cutting methods and finishing operations. The article examines the main technological operations for manufacturing bevel gears with straight and circular teeth, including modern processing methods, requirements for equipment and tools, and quality assurance issues for finished products.*

**Keywords:** *bevel gear transmissions, gear cutting, tooth formation, gear cutting tools, cutter heads, machining accuracy, generating methods.*

**Аннотация.** *Конические зубчатые передачи являются неотъемлемым элементом современного машиностроения, обеспечивая передачу крутящего момента между пересекающимися или скрещивающимися осями валов. Технология изготовления конических шестерен включает комплекс операций от получения заготовки до финишной обработки зубчатого венца. Особое внимание в производственном процессе уделяется точности формообразования боковых поверхностей зубьев, методам нарезания и отделочной обработки. В статье рассматриваются основные технологические операции изготовления конических шестерен с прямыми и круговыми зубьями, включая современные методы обработки, требования к оборудованию и инструменту, а также вопросы обеспечения качества готовых изделий.*

**Ключевые слова:** *конические зубчатые передачи, зубонарезание, формообразование зубьев, зуборезный инструмент, резцовые головки, точность обработки, методы обката.*

---

**Рецензент:** Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

## **Введение**

Конические зубчатые передачи представляют собой механические устройства, передающие вращательное движение и крутящий момент между валами с пересекающимися или скрещивающимися осями. В отличие от цилиндрических передач, где оси валов параллельны, конические передачи работают преимущественно под углом  $90^\circ$ , хотя возможны и другие угловые конфигурации. Эта особенность определяет их широкое применение в приводах автомобилей, авиационной техники, станков и другого промышленного оборудования, где требуется изменение направления передачи мощности.

Производство конических шестерен представляет собой технологически сложный процесс, требующий высокоточного оборудования и специализированного инструмента. При этом геометрия конических передач – начиная с формы зубьев и заканчивая конусностью заготовки – существенно усложняет процесс механической обработки по сравнению с изготовлением цилиндрических колес. Особенности конструкции определяют необходимость применения специфических методов формообразования зубьев, что предъявляет повышенные требования к квалификации персонала и организации производственного процесса.

Анализ современных технологических подходов показывает, что качество конических передач определяется точностью геометрических параметров зубьев, характеристиками контактного пятна в зацеплении, шероховатостью рабочих поверхностей и физико-механическими свойствами материала. Совокупность этих факторов обуславливает необходимость комплексного подхода к проектированию технологического процесса изготовления конических шестерен.

### **Заготовительные операции и подготовка базовых поверхностей**

Технологический процесс изготовления конических шестерен начинается с получения заготовки. В зависимости от размеров детали, требований к механическим свойствам и серийности производства применяются различные методы получения исходных заготовок. Для мелких и средних деталей в крупносерийном производстве наиболее распространена горячая объемная штамповка, обеспечивающая высокую производительность и экономию материала. При этом заготовка приобретает форму, приближенную к готовой детали, что сокращает объем последующей механической обработки.

В условиях единичного и мелкосерийного производства заготовки часто получают из проката путем отрезки и последующей токарной обработки. Для крупногабаритных конических колес применяют литье в песчаные формы или кокили,

обеспечивающее получение требуемых габаритных размеров при минимальных отходах металла.

Для сравнения данных методов получения заготовок приведу таблицу:

Метод	Преимущества	Недостатки	Применение
Отрезка от прутка	Простота, экономичность для малых деталей	Неэффективно для крупных заготовок	Малонагруженные шестерни до 50–60 мм
Штамповка	Сокращение припусков, сохранение структуры металла	Высокие требования к точности, часто нужна доработка	Крупные шестерни, где важна экономия металла
Литьё	Возможность сложных форм, экономия на начальной стадии для крупных партий	Низкая точность, риск дефектов	Крупные и сложные детали
Пластическое формообразование	Упрочнение металла, минимальный припуск	Требует специализированного оборудования	Перспективно для массового производства

Штамповка заготовок имеет ряд преимуществ: снижается расход металла из-за отсутствия облоя, форма заготовок ближе к готовой детали, экономия металла составляет от 10 до 30%.

После получения заготовки выполняется подготовка базовых поверхностей, которая включает черновую и получистовую токарную обработку. На этом этапе обрабатываются посадочное отверстие или поверхность вала, торцы детали, формируется наружный контур заготовки с припусками под последующие операции. Особое внимание уделяется точности базовых поверхностей – посадочного отверстия и торца, от которых зависит правильность установки заготовки при зубонарезании. Биение этих поверхностей не должно превышать 0,02–0,03 мм для колес средней точности. В процессе токарной обработки формируется также конусная поверхность заготовки под будущий зубчатый венец. Угол конуса должен соответствовать углу делительного конуса проектируемого колеса с учетом припуска на последующую обработку.

Режимы резания для токарной обработки подбираются по формуле самостоятельно. Примеры формул выглядят вот так:

Глубина резания (мм) Толщина срезаемого слоя за один проход, измеренна перпендикулярно обработанной поверхности:

$$t = \frac{D - d}{2}$$

где:

$D$  — диаметр заготовки до обработки (мм);

$d$  — диаметр после обработки (мм).

Скорость резания (мм/мин) Линейная скорость перемещения точки на поверхности заготовки относительно режущей кромки инструмента:

$$V = \frac{C_v \cdot K_v}{T^m \cdot t^x \cdot S^y}$$

:

$C_v$  — табличный коэффициент скорости (зависит от пары «материал заготовки — материал инструмента»);

$K_v$  — общий поправочный коэффициент ( $K_v = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{iv}$ );

$T$  — стойкость инструмента (мин, обычно 30–60 мин);

$m, x, y$  — показатели степени (берутся из таблиц);

$t$  — глубина резания (мм);

$S$  — подача (мм/об).

Частота вращения шпинделя ( $n$ , об/мин) Рассчитывается по формуле:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D}$$

где:

$V$  - скорость резания (м/мин);

$D$ -диаметр обрабатываемой поверхности (мм);

$\pi$  - 3,1415926535

Для токарной обработки конических шестерен можно использовать большое разнообразие режущих пластин и державок. Для примера приведу наиболее подходящую пластину WNMG 080404.

Токарные пластины серии WNMG— это сменные твердосплавные пластины тригональной формы ( $80^\circ$ ) с нулевым задним углом. Они широко применяются для обработки стали, нержавеющей стали, чугуна и жаропрочных материалов. Такие пластины двусторонние, что позволяет использовать до 6 режущих кромок, что повышает экономичность инструмента.

Пример пластины WNMG 080404



Расшифровка маркировки:

- W — тригональная форма пластины ( $80^\circ$ ). cncmagazine.ru +1
- N — задний угол равен  $0^\circ$  (отрицательная геометрия). cncmagazine.ru +1
- M — класс точности (стандартный допуск от  $\pm 0,08$  до  $\pm 0,18$ ). cncmagazine.ru +1
- G — пластина с цилиндрическим отверстием и формованной передней поверхностью на одной стороне.
- 08 — размер вписанной окружности (IC) примерно 8 мм.
- 04 — толщина пластины 4,76 мм.
- 04 — радиус при вершине 0,4 мм

Особенности пластин WNMG:

- Устойчивость к ударным нагрузкам и вибрациям благодаря прочной твердосплавной основе.
- Долговечность при высоких температурах.
- Универсальность: подходят для черновой и чистовой обработки.

### Методы нарезания зубьев конических колес

Основной и наиболее ответственной операцией в технологическом процессе изготовления конических шестерен является нарезание зубьев. Существует несколько принципиально различных методов формообразования зубчатого венца, выбор которых зависит от типа зубьев (прямые или круговые), требуемой точности, серийности производства и имеющегося оборудования.

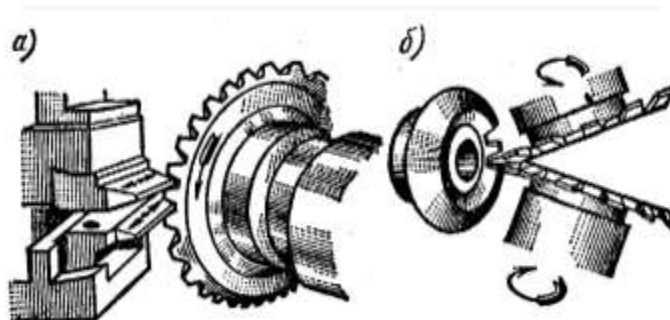
Таблица способов нарезания зубьев:

Метод	Описание	Применение	Особенности
<b>Метод копирования</b>	Профиль впадины зуба формируется инструментом, форма которого соответствует форме впадины нарезаемого колеса. После обработки одной впадины заготовка поворачивается на один зуб.	Дисковые и пальцевые модульные фрезы для цилиндрических колёс, штамповка для пластмасс.	Низкая производительность и точность (8–9 степень по ГОСТ), применяется в единичном и мелкосерийном производстве, ремонте.
<b>Метод обкатки</b>	Профиль зуба формируется как огибающая множества положений режущих кромок инструмента при синхронном вращении инструмента и заготовки.	Червячная фреза для цилиндрических колёс, долбяк для цилиндрических и внутренних колёс, резцовые головки для конических колёс с круговым зубом.	Высокая производительность и точность, возможность обрабатывать колёса одного модуля с любым числом зубьев.
<b>Зубофрезерование</b>	Обработка червячной или дисковой фрезой.	Цилиндрические наружные и внутренние колёса, червячные колёса.	При использовании червячной фрезы — метод обкатки, при дисковой — копирования.
<b>Зубострогание</b>	Обработка двумя резами, которые образуют исходный контур впадины производящего колеса.	Конические прямозубые колёса.	Применяется на специализированных станках (например, 5A250, 5A283).
<b>Протягивание</b>	Использование длинного режущего инструмента (протяжки) с несколькими степенями резания.	Серийное производство, внутренние шлицы и зубчатые втулки.	Высокая производительность, применяется для крупносерийного производства.

Нарезание прямых зубьев конических колес осуществляется преимущественно методом обката на зубострогальных станках. Сущность метода заключается в воспроизведении зацепления обрабатываемого колеса с плоским или коническим производящим колесом, роль зубьев которого выполняют два резца – наружный и

внутренний. Резцы совершают возвратно-поступательное движение резания, а люлька с резцами и заготовка получают согласованное вращательное движение обката. За время поворота заготовки на один зуб люлька поворачивается на угол, соответствующий одному зубу производящего колеса.

Пример метода обката:



Процесс нарезания прямозубых конических колес характеризуется сравнительно невысокой производительностью из-за значительных затрат времени на холостые ходы инструмента. Впрочем, метод обеспечивает достижение 6–7 степени точности на станках повышенной точности и 7–8 степени на станках нормальной точности при использовании простого и недорогого инструмента. Важным преимуществом является универсальность метода – на одном станке с одним комплектом резцов можно обрабатывать конические колеса различных модулей и чисел зубьев.

Для нарезания конических колес с круговыми зубьями применяют зуборезные станки, работающие методом обката с использованием резцовых головок. Круговые (спиральные) зубья обеспечивают более высокую несущую способность передачи, плавность работы и пониженный уровень шума по сравнению с прямозубыми аналогами. Резцовая головка представляет собой дисковый инструмент диаметром 70–600 мм, на периферии которого размещаются наружные и внутренние резцы из быстрорежущей стали или твердого сплава.

Пример резцовой головки:



В процессе обработки вращающаяся резцовая головка совершает медленное качательное движение вокруг оси производящего колеса (движение обката), а заготовка вращается согласованно с этим движением. Движение обката и вращение заготовки кинематически связаны через делительный механизм станка таким образом, что за время поворота заготовки на один зуб люлька с резцовой головкой поворачивается на угол, соответствующий одному зубу производящего колеса. Процесс характеризуется высокой производительностью благодаря одновременной обработке обеих сторон зуба и возможности применения жестких режимов резания.

### **Специализированный инструмент и оборудование**

Качество конических зубчатых колес в значительной степени определяется точностью применяемого зуборезного инструмента и оборудования. Для нарезания прямозубых конических колес используются зубострогальные станки моделей 5Б27, 5А250П, оснащенные специальными резцами с пластинами из быстрорежущей стали Р6М5 или твердого сплава Т15К6.

Пример зубострогательного станка 5Б27:



Конструкция резцов должна обеспечивать формирование требуемого профиля зуба и возможность многократной переточки без существенного изменения геометрических параметров.

Нарезание конических колес с круговыми зубьями требует применения специализированных зуборезных станков типа 5Т23А, 5240, 53А80, оснащенных резцовыми головками. Номенклатура резцовых головок весьма разнообразна – существуют головки для черновой и чистовой обработки, односторонние и двусторонние, правого и левого исполнения. Номинальный диаметр головки выбирается в зависимости от среднего конусного расстояния нарезаемого колеса, модуля и угла наклона зубьев по специальным таблицам ГОСТ 19326-73. последние годы для изготовления конических колес все шире применяются обрабатывающие центры с ЧПУ, оснащенные специальными зуборезными фрезами. Такое оборудование позволяет реализовать гибкие технологические процессы, сократить время переналадки при переходе на обработку колес другой номенклатуры и обеспечить высокую повторяемость параметров качества. Применение твердосплавного инструмента на станках с ЧПУ дает возможность повысить производительность обработки в 2–3 раза по сравнению с традиционными методами. Термическая обработка и финишные операции зубонарезания конические шестерни подвергаются термической обработке для достижения требуемых механических свойств материала. Для деталей из цементуемых сталей применяют цементацию (насыщение поверхностного слоя углеродом) с последующей закалкой и низким отпуском. Толщина цементованного слоя составляет 0,8–1,2 мм в зависимости от модуля и условий эксплуатации. Твердость поверхности зубьев после цементации и закалки достигает 58–62 HRC при твердости сердцевины 30–45 HRC. колес из улучшаемых сталей применяют объемную закалку с высоким отпуском (улучшение) или поверхностную закалку токами высокой частоты.

Последний метод обеспечивает высокую твердость рабочих поверхностей зубьев (50–56 HRC) при сохранении вязкой сердцевины, что повышает контактную прочность и износостойкость передачи при обеспечении достаточной изгибной прочности зубьев. обработка неизбежно вызывает деформации деталей, приводящие к снижению точности зубчатого венца на 1–2 степени. Для ответственных передач после термообработки выполняют финишные операции – зубошлифование, зубохонингование или притирку. Шлифование зубьев конических колес осуществляется на специальных зубошлифовальных станках типа 58K70В методом обката с применением тарельчатых или конических шлифовальных кругов.

Пример тарельчатого и конического шлифовального круга:



Процесс позволяет повысить точность колеса до 5–6 степени и обеспечить шероховатость поверхности зубьев  $Ra = 0,63–1,25$  мкм.зубьев выполняется на зубопритирочных станках в зацеплении с чугунным притиром при подаче абразивной пасты в зону контакта. Процесс обеспечивает приработку рабочих поверхностей, улучшение контакта в передаче и снижение шероховатости до  $Ra = 0,32–0,63$  мкм. Для контроля качества изготовленных колес применяют контрольно-обкатные станки, позволяющие оценить кинематическую точность передачи, плавность работы и характер пятна контакта зубьев. Особенности технологии изготовления гипоидных передач представляют собой разновидность конических передач со смещением осей, что обеспечивает ряд эксплуатационных преимуществ – повышенную нагрузочную способность, плавность работы, возможность рационального компоновочного решения. Однако смещение осей существенно усложняет технологию изготовления гипоидных колес. Зубья гипоидной передачи имеют сложную криволинейную форму, отличающуюся от эвольвентной, что требует применения специализированного оборудования и инструмента.гипоидных колес осуществляется на станках типа 5С268,

5С272Е методом обката с использованием специальных резовых головок. При этом станок должен обеспечивать сложное согласованное движение инструмента и заготовки с учетом величины смещения осей и других геометрических параметров передачи. Настройка станка на обработку гипоидной пары требует высокой квалификации наладчика и тщательного расчета кинематических цепей. особенностью эксплуатации гипоидных передач является повышенная опасность заедания из-за значительного скольжения зубьев вдоль линии контакта. Это предъявляет особые требования к качеству рабочих поверхностей зубьев и применению специальных гипоидных масел с противозадирными присадками. После термообработки гипоидные колеса обязательно подвергают притирке для обеспечения правильного контакта в паре и удаления микронеровностей, являющихся концентраторами напряжений. Контроль качества и обеспечение точности требуемого качества конических зубчатых передач невозможно без организации эффективной системы контроля на всех этапах технологического процесса. Контроль точности конических колес осуществляется в соответствии с ГОСТ 1758-81, регламентирующим нормы точности и методы контроля конических передач. Стандарт устанавливает 12 степеней точности и предусматривает раздельное нормирование кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев. точность характеризует постоянство передаточного отношения и контролируется по кумулятивной погрешности окружного шага, радиальному биению зубчатого венца, погрешности профиля зуба. Плавность работы определяет уровень динамических нагрузок в зацеплении и оценивается по местной кинематической погрешности, отклонению шага зацепления. Контакт зубьев в передаче характеризуется размерами и расположением пятна контакта, которое проверяется на краску при обкатке колес под нагрузкой. измерения геометрических параметров зубьев применяют универсальные и специализированные средства контроля. Толщину зуба измеряют штангензубомером, нормальную хорду – индикаторным зубомером, биение зубчатого венца – индикаторной головкой при установке колеса в центрах. Более точные измерения выполняют на координатно-измерительных машинах, позволяющих определить отклонения профиля и направления зубьев с погрешностью менее 1 мкм. показателем качества термообработанных колес является твердость поверхности зубьев, которая контролируется на твердомерах типа ТК-2, ТШ-2М в нескольких точках по профилю зуба. Микроструктура материала оценивается металлографическим анализом шлифов, изготовленных из контрольных образцов или забракованных деталей. Глубина цементованного слоя измеряется по распределению твердости от поверхности вглубь материала.

## Заключение

Изготовление конических шестерен представляет собой сложный технологический комплекс, включающий заготовительные операции, механическую обработку базовых поверхностей, нарезание зубьев, термическую обработку и финишные операции. Каждый этап процесса оказывает влияние на качество готовой передачи, что требует тщательного контроля параметров на всех стадиях производства. Тенденции развития технологии изготовления конических передач связаны с применением станков с ЧПУ и обрабатывающих центров, использованием твердосплавного инструмента, внедрением автоматизированных систем проектирования технологических процессов. Перспективным направлением является разработка комбинированных методов обработки, сочетающих резание и пластическое деформирование, что позволяет повысить производительность и качество поверхности зубьев. Совершенствование технологии изготовления конических шестерен должно быть направлено на повышение точности и стабильности процессов формообразования, сокращение вспомогательного времени, снижение материалоемкости и энергопотребления. Решение этих задач возможно на основе комплексного подхода, включающего модернизацию оборудования, разработку новых инструментальных материалов и покрытий, оптимизацию режимов обработки с использованием математического моделирования.

## References

1. Иваненко Е.С. Применение 4-х координатного обрабатывающего центра с ЧПУ для изготовления конических зубчатых колес с круговым зубом // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований.
2. Макаров В.Ф., Горбунов А.С. Повышение качества и надежности зубьев спирально-конических шестерен технологическими методами // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета.
3. Маликов А.А., Сидоркин А.В., Легейда В.Ю. Технологическое обеспечение ресурсосберегающих процессов изготовления цилиндрических зубчатых колес Известия Тульского государственного университета. Технические науки.
4. Писманик К.М., Шейко Л.И., Денисов В.М. Станки для обработки конических зубчатых колес. М.: Машиностроение, Технология нарезания круговых зубьев конических колес. Металлорежущее оборудование и САПР
5. Балков В.П., Каменецкий Л.И., Кирютин А.С., Негинский Е.А., Отт О.С., Пищулин Д.Н. Современные технологические подходы при изготовлении

цилиндрических зубчатых колес в условиях мелкосерийного производства и особенности расчета и проектирования зуборезного инструмента Металлообработка.

6. Виноградов В.М., Черепухин А.А. Зависимость точности изготовления цилиндрических зубчатых передач от точности изготовления их основных деталей и сборки Известия Московского государственного технического университета МАМИ